Дифференциальные уравнения ФПМИ.

TeX:**Астафуров Евгений**

10 июня 2020 г.

Содержание

1 Методы решения простейших уравнений первого порядка

$$P(x,y)dx + Q(x,y)dy = 0. \tag{1}$$

Определение 1 (*Интегрируемость в квадратурах*)**.** Говорят, что уравнение (1) разрешимо или интегрируемо в квадратурах, если все его решения выражаются явным или неявным образом через элементарные функции с помощью конечного числа арифметических операций, суперпозиций и операций нахождения первообразных.

P.S.

В прежние века первообразную $\int f(x)\,\mathrm{dx}$ называли квадратурой $f(x)$. Отсюда и происходит название «решение в квадратурах».

1.1 Однородные уравнения первого порядка

Уравнение (1) будем называть *однородным уравнением первого порядка*, если при $x \neq 0$ его можно записать в виде:

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

Заменой $y = xu$, где $u = u(x)$ — новая неизвестная функция, сводится к эквивалентному уравнению

$$xu' + u = f(u)$$

Возможны следующие случаи:

1. Если $f(u) \neq u$, то эквивалентно $\frac{du}{f(u)-u} = \frac{dx}{x}$;
2. Если $f(u) \equiv u$, то эквивалентно $xu' = 0$;

2 Методы понижение порядка дифференциальных уравнений второго порядка

Общий вид дифференциального уравнения второго порядка:

$$F(x, y, y', y'') = 0, \tag{2}$$

где $F(x, y, y', y'')$ — заданная непрерывная функция в некоторой непустой области G евклидова пространства R^4 с декартовыми координатами x, y, y_1, y_2.

Перейдем к рассмотрению основных типов уравнений (2), допускаю щих понижение порядка уравнения. После понижения порядка уравнения (2) получается уравнение первого порядка.

1. (*Не содержит* y)

   Пусть уравнение (2) не содержит y, то есть имеет вид

   $$F(x, y', y'') = 0.$$

   Тогда замена $\boxed{y' = z(x)}$ дает уравнение первого порядкка относительно новой неизвестной функции $z(x)$: $F(x, z, z') = 0$, и если функция $z = \varphi(x, C_1)$, где C_1 — параметр, задает его решения, то функция

   $$\boxed{y = C_2 + \int \varphi(x, C_1)\,\mathrm{dx}},$$

   где C_2 — произвольная постоянная, задает решения исходного уравнения.

2. (*Не содержит* x)

   Пусть уравнение (2) не содержит x, то есть имеет вид

   $$F(y, y', y'') = 0.$$

   Будем считать, что $y = \text{const}$ не является его решением. В таком случае примем y за новый аргумент и введем новую неизвестную функцию $z(y)$ по формуле $y' = z(y)$. Тогда $y'' = \frac{dy'}{dx} = \frac{dy'}{dy} \cdot \frac{dy}{dx} = \frac{dz}{dy} \cdot z(y) = z \cdot z'$. В случае получаем уравнение первого порядка

   $$\boxed{F(y, z, zz') = 0},$$

   так как $z \neq 0$. Если же $y = \text{const}$, то нельзя брать y в качестве нового аргумента. Поэтому принимая y за новый аргумент, всегда следует проверять, не теряем ли мы при этом решений вида $y = \text{const}$.

3. (*Случай однородной функции*)

   Функция $F(x, y, y_1, y_2)$ называется однородной функцией степени m относительно переменных y, y_1, y_2, если для любой точки (x, y, y_1, y_2) и любого значения параметра t, выполнено условие $F(x, ty, ty_1, ty_2) = t^m F(x, y, y_1, y_2)$.

   Уравнение (2) называется однородным уравнением переменных y, y', y'', если $F(x, y, y_1, y_2)$ — однородная функция степени m относительно переменных y, y_1, y_2.

   Если уравнение (2) является однородным относительно y, y', y'', то его порядок понижается с помощью замены $y' = y \cdot z$, где $z = z(x)$ — новая неизвестная функция. В этом случае $y'' = y(z' + z^2)$, следовательно

   $$F(x, y, y', y'') = F(x, y, yz, y(z' + z^2)) = y^m F(x, 1, z, z' + z^2) = 0.$$

   Здесь мы воспользовались однородностью функции F. Если $m > 0$, то получаем решение $\boxed{y = 0}$. Если $y \neq 0$, то имеем для функции z уравнение первого порядка

   $$\boxed{F(x, 1, z, z' + z^2) = 0}.$$

   Если множеством его решений является функция $z = \varphi(x, C_1)$, то $y = C_2 e^{\int \varphi(x, C_1)\,\mathrm{dx}}$.

4. (*Уравнение в точных производных. Интегрирующий множитель*)

   Если для некоторой $\Phi(x, y, y')$ при всех x, y, y', y'' спараведливо тождество $F(x, y, y', y'') = \frac{d}{dx}\Phi(x, y, y')$, то уравнение (2) называется *уравнением в точных производных*. В таком случае, очевидно, уравнение (2) эквивалентно уравнению первого порядка

$$\boxed{\Phi(x, y, y') = C}.$$

   Иногда уравнение (2) становится таковым лишь после его умножения на некоторую функцию $\mu(x, y, y')$ — интегрирующий множитель.

5. *(Случай обобщенно-однородной функции)*

   Функция F называется обобщенно-однородной степени m, если существует такое k, что для любого t выполнено условие

$$F(tx, t^k y, t^{k-1} y_1, t^{k-2} y_2) = t^m (x, y, y_1, y_2).$$

   Если уравнение (2) является обобщенно-однородным и $x > 0$, то его порядок понижается на единицу с помощью замены $\begin{cases} x = e^u, \\ y = ve^{ku} \end{cases}$ где u — новый аргумент, $v = v(u)$ — новая искомая функция. Если же $x < 0$, то полагаем $x = -e^u$. Опуская поиск выражений для y' и y'' через новые переменные, имеем:

$$\boxed{F(x, y, y', y'') = F(1, v, v' + kv, v'' + (2k-1)v' + k(k-1)v) = 0}.$$

3 Уравнения, не разрешенные относительно производной. Особые решения

Уравнениями первого порядка, неразрешенными относительно производной, называются уравнения вида

$$F(x, y, y') = 0 \tag{3}$$

Если данное уравнение возможно разрешить относительно y', то получим одно или несколько уравнений вида $y' = f(x, y)$, каждое из которых надо решить.

Если же уравнение (3) возможно разрешить относительно x или y, то нужно воспользоваться методом введения параметра.

3.1 Уравнения, разрешимые относительно искомой функции y

Предположим, что уравнение (3) можно записать в виде $y = f(x, y')$, тогда вводя параметр $p = \frac{dx}{dy} = y'$, получаем функцию $y = f(x, p)$, от обеих частей которой нужно взять полный дифференциал:

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x}dx + \frac{\partial f}{\partial p}dp.$$

Далее, избавляясь заменяя dy на pdx имеем два случая:

1. Если возможно найти $p = p(x, C)$, то подставляя его в (3), получаем $y = f(x, p(x, C))$ — общее решение (3).

2. Если возможно найти $x = \varphi(p, C)$, то исключая параметр p из системы $\begin{cases} x = \varphi(p, C) \\ y = f(\varphi(p, C), p) \end{cases}$ получаем общее решение (3).

3.2 Уравнения, разрешимые относительно аргумента x

Если уравнение (3) можно записать в виде $x = f(y, y')$, то действуя аналогично предыдущему пункту получаем общее решение (3) как $x = f(y, C)$.

Заметим, что бывает удобно вводить параметр p как $p = \frac{1}{y'}$.

3.3 Особые решения

Особым решением (3) на некотором множестве I называется его решение $y_0 = g(x)$, если $\forall x_0 \in I$ через точку графика особого решения $(x_0, g(x_0))$ проходит другое решение, отличное от особого в сколь угодно малой окрестности этой точки, и имеющее ту же касательную.

То есть, если $y = y(x, C)$ — семейство решений (3) , не совпадающих с особым решением $y_0(x)$, то $\forall x_0 \in I$ выполнено *условие касания*: $\begin{cases} y_0(x_0) = y(x_0, C) \\ y_0'(x_0) = y'(x_0, C). \end{cases}$

Алгоритм нахождения особых решений

1. Найти решения (3).

2. Найти p-дискриминантное множество, исключив параметр p из системы $\begin{cases} F(x, y, p) = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial p} = 0. \end{cases}$

3. Отобрать те из решений уравнения (3), которые пересекаются с p-дискриминантным множеством.

4. Для отобранных на предыдущем шаге проверить достаточное условие особого решения, то есть проверить выполнения при любом $x_0 \in I$ условий касания $\begin{cases} y_0(x_0) = y(x_0, C) \\ y_0'(x_0) = y'(x_0, C), \end{cases}$ где $y(x, C)$ — семейство решений (3).

4 Линейные уравнения с переменными коэффициентами.

4.1 Вронскиан W и его свойства.

Вронскиан или **определитель Вронского** — функция $W(f_1, ..., f_n)(x)$, определенная для системы функций $f_1(x), ..., f_n(x)$ на промежутке I:

$$W(f_1, ..., f_k)(x) = det \begin{pmatrix} f_1(x) & f_1(x) & ... & f_n(x) \\ f_1'(x) & f_1'(x) & ... & f_n'(x) \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ f_1^{(n-1)}(x) & f_1^{(n-1)}(x) & ... & f_n^{(n-1)}(x) \end{pmatrix} \tag{4}$$

Свойства:

1. Если функции $f_1, ..., f_n$ — линейно зависимы на I, то $\forall x \in I$ $W(x) = 0$.
2. Если $\exists x_0 \in I : W(x_0) \neq 0$, то $f_1, ..., f_n$ — линейно независимы на I.
3. Если $f_1, ..., f_n$ — решения однородного дифференциального уравнения n-ого порядка, то возможны только два варианта:
   (a) $\forall x \in I$ $W(x) = 0$, это значит, что $f_1, ..., f_n$ — линейно зависимы на I.
   (b) $\nexists x_0 \in I$ т.ч. $W(x_0) = 0$, это, в свою очередь, значит, что $f_1, ..., f_n$ — линейно независимы.

4.2 Пример исследования функций на линейную зависимость (Задача Ф648)

Исследовать на линейную зависимость: e^x, e^{2x}, e^{3x}.

Решение:

$$W(e^x, e^{2x}, e^{3x}) = det \begin{pmatrix} e^x & e^{2x} & e^{3x} \\ e^x & 2e^{2x} & 3e^{3x} \\ e^x & 4e^{2x} & 9e^{3x} \end{pmatrix} = ... = 6e^{6x},$$

следовательно функции линейно независимы.

4.3 Пример построения системы уравнений, имея частные решения (Задача Ф.22.59)

Известны три частных решения неоднородного уравнения второго порядка: $\begin{cases} y_1 = x^2, \\ y_2 = 1 - x, \\ y_3 = 1 - 3x \end{cases}$ найти решение уравнения с начальными условиями: $\begin{cases} y(0) = 2, \\ y'(0) = 0 \end{cases}$.

Решение:

Известно, что разность двух частных решений есть базисное решение однородного уравнения:

$$\begin{cases} y_{10} = y_3 - y_2 = -2x, \\ y_{20} = y_1 - y_2 = x^2 + x - 1 \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} y_{10} = -x, \\ y_{20} = x^2 - 1 \end{cases}$$

Так как y_{10} и y_{20} — решения однородного дифференциального уравнения, то их вронскиан (4) должен равняться нулю. Найдем однородное уравнение из этого условия:

$$det \begin{pmatrix} y & x^2 - 1 & -x \\ y' & 2x & -1 \\ y'' & 2 & 0 \end{pmatrix} = 0$$

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

$$y''(x^2 - 1) - 2xy' + 2y = 0 — \textbf{Однородное.}$$

Теперь получим неоднородное уравнение, подставив в однородное частное решение $y_2 = 1 - x$: $0 \cdot (x^2-1) - 2x(-1) + 2(1-x) = 2$, откуда неоднородное уравнение:

$$y''(x^2-1) - 2xy' + 2y = 2.$$

Общее решение уравнени имеет вид: $y = (x^2-1)\cdot C_1 + C_2 \cdot x + (1-x)$.

4.4 Формула Луивилля-Остроградского

Пусть дано однородное уравнение второго порядка:

$$a(x)y'' + b(x)y' + c(x)y = 0.$$

Тогда справедлива формула *Луивилля-Остроградского*:

$$\frac{d}{dx}(\frac{y}{y_{1o}}) = C_0 \cdot \frac{1}{y_{1o}^2} \cdot exp\left(-\int \frac{b(x)}{a(x)}dx\right), \tag{5}$$

где y — решение однородного уравнения, y_{1o} — одно из частных решений однородного уравнения, C_0 — некоторая константа. Под интегралом в практическом смысое понимается первообразная, так как вылезшая константа будет поглощена C_0.

4.5 Алгоритм решения линейных уравнений $n = 2$ с переменными коэффициентами

Общая идея состоит в том, чтобы подобрать одно частное решение однородного, а затем, с помощью формулы Луивиля-Остроградского (5) найти второе частное решение однородного уравнения.

Пусть есть уравнение:

$$a(x)y'' + b(x)y' + c(x)y = f(x).$$

1. Найти одно частное решение однородного уравнения, пробуя подстановки (в указанном порядке):
   (a) $y_{1o} = e^{ax}$,
   (b) $y_{1o} = x^k$,
   (c) $y_{1o} = P(x)$, $deg(P) = k$ — в виде многочлена.
2. Применить формулу Луивилля-Остроградского (5) и получить решение однородного уравнения: $y_o = y_{1o}D + y_{2o}C$, где D, C — константы.
3. Воспользовоться методом вариации постоянной:
$$\begin{cases} D'(x)y_{1o} + C'(x)y_{2o} = 0, \\ D'(x)y'_{1o} + C'(x)y'_{2o} = \frac{f(x)}{a(x)}. \end{cases} \tag{6}$$
4. Подставить найденные $C(x)$ и $D(x)$ в решение однородного уравнения, тем самым получить решение неоднородного уравнения.

4.6 Пример — Задача С.9.53

Решить: $x(x+1)y'' + (4x+2)y' + 2y = 6(x+1)$.

Решение:

Отыщем для начала частное решение однородного уравнения. Для этого попробуем замену $y = e^{ax}$:

$$a^2(x^2+x) + a(4x+2) + 2 = 0,$$
$$z^2x^2 + a^2x + 4ax + 2a + 2 = 0,$$
$$x^2a^2 + x(a^2+4a) + (2a+2) = 0,$$
$$\begin{cases} a = -1, \\ a^2 + 4a = 0, \\ a^2 = 0 \text{ — } \textbf{не подходит.} \end{cases}$$

Попробуем замену $y = x^k$:

$$
\begin{gathered}
(x^2+x)(k^2-k)x^{k-2} + k(4x+2)x^{k-1} + 2x^k = 0, \\
xk^2 - kx + k^2 - k + 4kx + 2k + 2x = 0, \\
x(k^2 - k + 4k + 2) + (k^2 + k) = 0, \\
\begin{cases} k^2 + 3k + 2 = 0, \\ k + 1 = 0 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \boxed{k = -1}.
\end{gathered}
$$

Таким образом, частное решение: $y_{o1} = \frac{1}{x}$.

Найдем второе частное решение с помощью формулы Луивилля-Остроградского (5):

$$
\begin{gathered}
\frac{d}{dx}(yx) = Cx^2 exp\left(-\int \frac{4x+2}{x^2+x}dx\right), \\
\int \frac{4x+2}{x^2+x}dx = \int \frac{2}{x}dx + \int \frac{2}{x+1}dx = 2\ln x + 2\ln x + 1, \\
exp(-\ln x^2 - \ln{(x+1)^2}) = \frac{1}{x^2} \cdot \frac{1}{(x+1)^2}, \\
\frac{d}{dx}(yx) = \frac{c}{(x+1)^2}, \text{ откуда} \\
yx = -\frac{C}{x+1} + D = \frac{C}{x+1} + D, \\
\boxed{y = \frac{D}{x} + \frac{C}{x(x+1)}} \text{ — \textbf{однородное.}}
\end{gathered}
$$

Далее воспользуемся методом вариации постоянной (6):

$$
\begin{gathered}
\begin{cases} D'\frac{1}{x} + C'\frac{1}{x(x+1)} = 0, \quad D' = -\frac{C'}{x+1} \\ -D'\frac{1}{x^2} - C'\frac{2x+1}{x^2(x+1)^2} = \frac{6}{x} \end{cases}, \\
C' = -6(x+1)^2 \;\Rightarrow\; C = -2(x+1)^3 + C_1, \\
D' = 6(x+1) \;\Rightarrow\; D = 3(x+1)^2 + D_1,
\end{gathered}
$$

следовательно, получаем решение:

$$
y = \frac{(x+1)^2}{x} + \frac{C_1}{x(x+1)} + \frac{D_1}{x}.
$$

4.7 Задача С.9.68(а)

Составить и решить линейное дифференциальное уравнение второго порядка, если известна его правая часть $f(x)$ и ФСР $y_1(x)$ и $y_2(x)$ соответствующего однородного уравнения:

$$
\begin{cases} f(x) = 1 - x^2, \\ y_1 = x, \\ y_2 = x^2 + 1. \end{cases}
$$

Решение:

Пусть y_o — решение однородного уравнения, тогда, так как y_o, y_1, y_2 — линейно зависимы, то их вронскиан равен нулю:

$$
\begin{gathered}
det\begin{pmatrix} x & x^2+1 & y_o \\ 1 & 2x & y_o' \\ 0 & 2 & y_o'' \end{pmatrix} = y_o''(x^2-1) - 2xy_o' + 2y_o = 0 \text{ — однородое уравнение,} \\
\boxed{y''(x+2-1) - 2xy' + 2y = 1 - x^2} \text{ — исходное уравнение.}
\end{gathered}
$$

Далее пользуясь методом варианции постоянной (6), получаем решение данного уравнения.

4.8 Задача про уравнение Бесселя (Т3-2020).

Доказать, что уравнение бесселя не может иметь двух линейно независимых решений, ограниченных в окрестности нуля вместе со своими производными.

$$x^2y'' + xy' + (x^2 - \nu^2)y = 0,\ \nu = const,\ x > 0.$$

Решение:
Предположим обратное, то есть что нашлись такие y_1, y_2 ЛНЗ решения (4), тогда:

$$W(y_1, y_2)(x) = det\begin{pmatrix} y_1 & y_2 \\ y_1' & y_2' \end{pmatrix} = C \cdot exp\left(-\int \frac{x}{x^2}\right) = C \cdot exp\left(-\ln x + D\right) = \frac{C}{x} + D$$

Но при $x \longrightarrow 0$, $\frac{C}{x} \longrightarrow \infty \Rightarrow (y_1y_2' - y_2y_1') \longrightarrow \infty \Rightarrow$ противоречие с условием.

5 Теорема Штурма

5.1 Формулировка теоремы

<u>**Теорема:**</u> Пусть для любого $x \in I$ выполнено $\mathbf{q(x)} \leq \mathbf{Q(x)}$, и $\begin{cases} y(x) \text{ — решение } y'' + q(x)y = 0, \\ z(x) \text{ — решение } z'' + Q(x)z = 0. \end{cases}$. Пусть $x_1 < x_2$ — последовательные нули $y(x)$, тогда либо $z(x_1) = z(x_2) = 0$, либо $\exists x_0 \in (x_1, x_2)$, что $z(x_0) = 0$.

5.2 Неформальная трактовка теоремы

Нули функции $y(x)$ идут не чаще нулей $z(x)$.

5.3 Задача С.10.3 + уравнение Эйлера

Показать, что каждое решение уравнения $y'' + \frac{1}{1+x^2}y = 0$ имеет на промежутке $[0; +\infty)$ бесконечно много нулей.

Решение:

Достаточно показать, что бесконечно много нулей на интегрвале $x \in (1, +\infty)$ Пусть $Q(x) = \frac{1}{1+x^2}$ и $q(x) = \frac{1}{2x^2}$, очевидно, что $q(x) \leq Q(x)$. Задача свелась к тому, чтобы показать, что любое решение уравнения $z'' + q(x)z = 0$ имеет ∞ много нулей.

Решим уравнение $z'' + \frac{1}{2x^2}z = 0$ как уравнение **Эйлера**: $z(x) = ax^b$, $z'(x) = abx^{b-1}$, $z'' = ab(b-1)x^{b-2}$:

$$ab(b-1)x^{b-2} + \frac{ax^b}{2x^2} = 0,$$
$$ab(b-1)x^{b-2} + \frac{a}{2}x^{b-2} = 0,$$
$$ab^2 - ab + \frac{a}{2} = 0,$$
$$a(b^2 - b + \frac{1}{2}) = 0,$$

, откуда $a = 1$, $b = \frac{1 \pm i}{2} = \alpha$. Получаем решение:

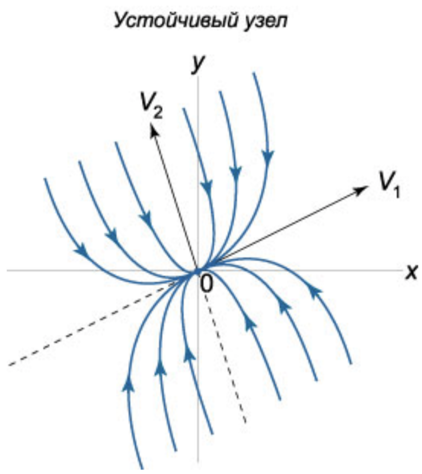
$$z(x) = x^\alpha = e^{\alpha ln(x)} = e^{\frac{1\pm i}{2} ln(x)} = \sqrt{x}(\cos\frac{1}{2}\ln x \pm i \sin\frac{1}{2}\ln x)$$

— ∞ раз обращается в 0.

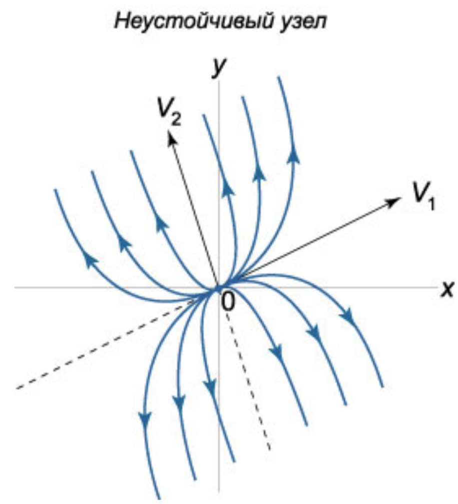
6 Положения равновесия.

Источник.

6.1 Узел — $\lambda_1 \neq \lambda_2 \in \mathbb{R}$ одного знака.



а)



б)

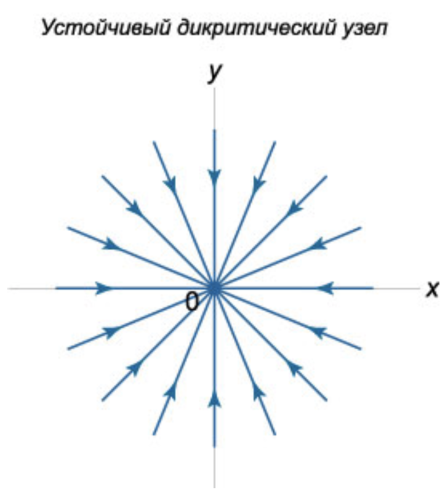
Рис. 1:

V_1 и V_2 — собственные векторы, коответствующие собственным значениям $|\lambda_1| < |\lambda_2| \in \mathbb{R}$

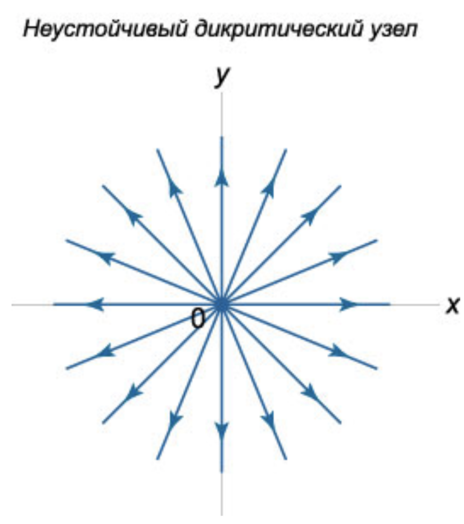
Узел является ассимптотически устойчивым, если $\lambda_1 < 0$ и $\lambda_2 < 0$.

Заметим, что в случае как устойчивого, так и неустойчивого узла фазовые траектории касаются прямой, которая направлена вдоль собственного вектора, соответствующего меньшему по абсолютной величине собственному значению λ.

6.2 Дикритический узел — $\lambda_1 = \lambda_2 \neq 0 \in \mathbb{R}$, λ кратности 2.



а)



б)

Рис. 2:

При $\lambda < 0$ — устойчивый.

6.3 Вырожденный узел — $\lambda_1 = \lambda_2 \neq 0 \in \mathbb{R}$, λ кратности 1

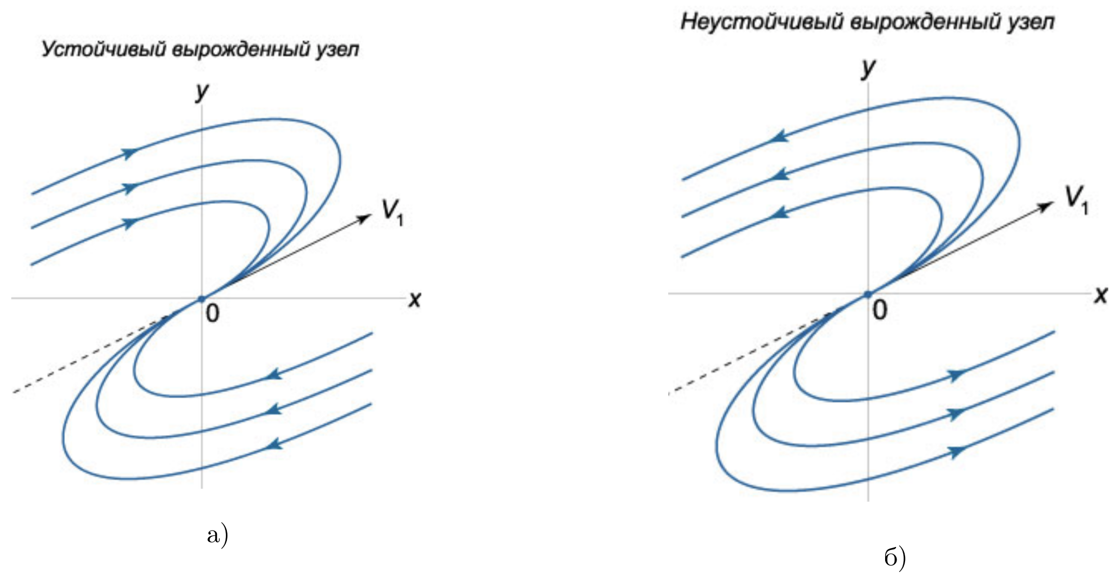


Рис. 3:

Матрица A имеет лишь один собственный вектор V_1, второй собственный вектор ищется как присоединенный к V_1.

При $\lambda < 0$ — устойчивый.

6.4 Седло — $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$ разных знаков, не равны 0.

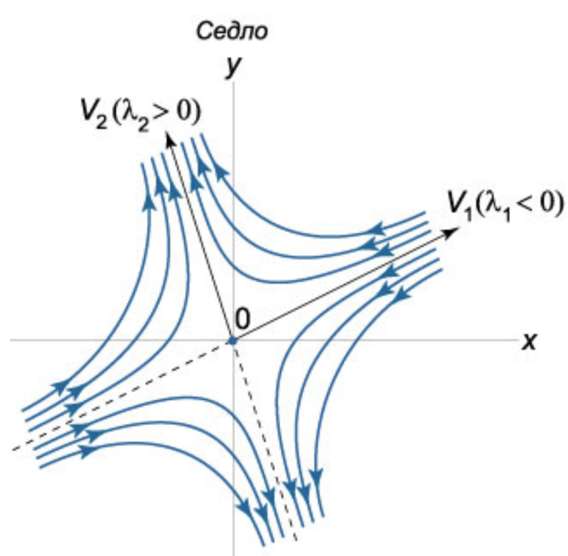


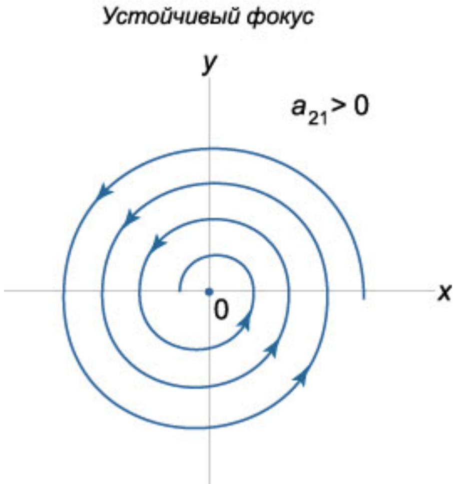
Рис. 4:

Прямые, направленные вдоль векторов V_1, V_2 называются сепаратиссами, и являются ассимптотами для остальных фазовых траекторий, имеющих форму *гипербол*.

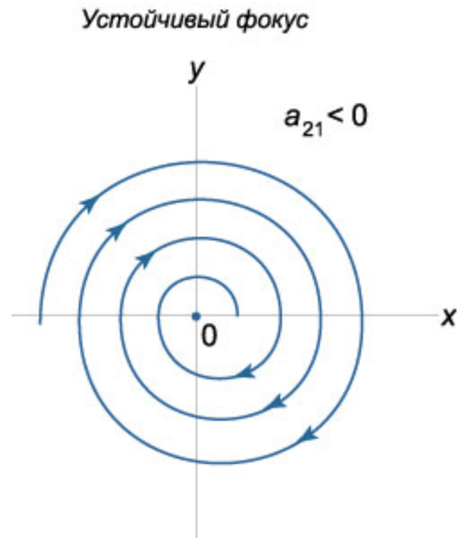
Определение направления:

- Если прямая связана с $\lambda < 0$, то движение вдоль нее направлено **к положению равновесия**.
- Если прямая связана с $\lambda > 0$, то направление **от положения равновесия**.

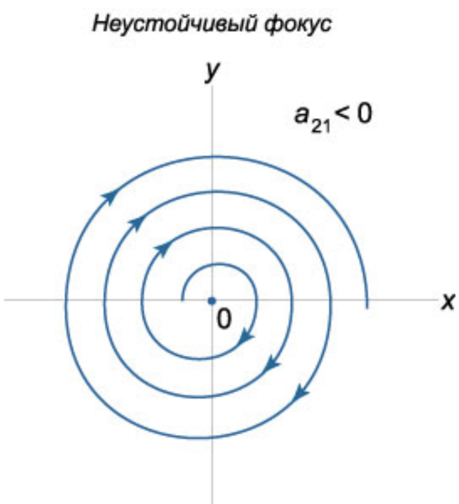
6.5 Фокус — $\lambda_{1,2} \in \mathbb{C}$; $Re\lambda_1 = Re\lambda_2 \neq 0$.



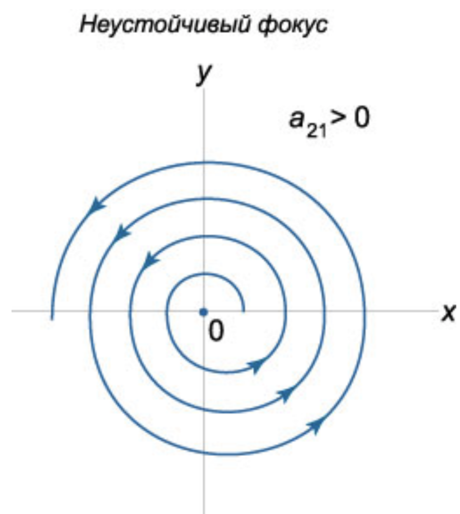
а)



б)



в)



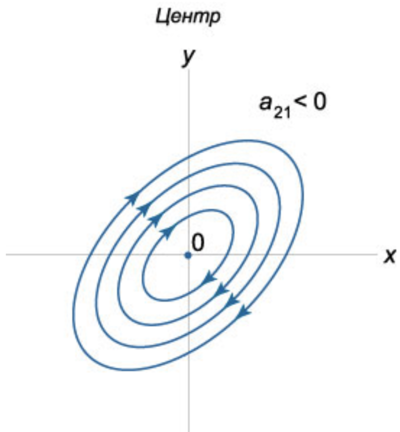
г)

Рис. 5:

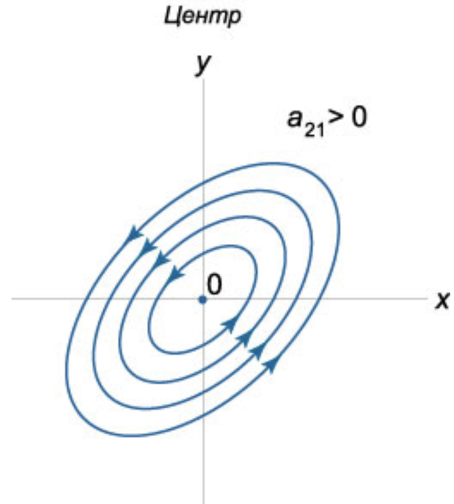
- При $Re\lambda < 0$, спирали будут закручиваться, приближаясь к началу координат. Такое положение равновесия называется **устойчивым фокусом**.
- При $Re\lambda > 0$ — **неустойчивый фокус**.

Где $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$ — матрица системы.

6.6 Центр — $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{C}$; $Re\lambda_1 = Re\lambda_2 = 0$ — Устойчивое по Ляпунову.



а)



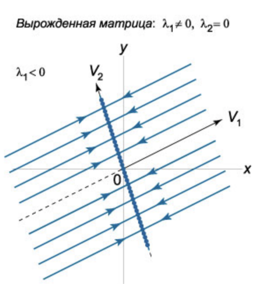
б)

В случае центра фазовые траектории представляют собой формально спирали при $Re\lambda = 0$, то есть эллипсы.

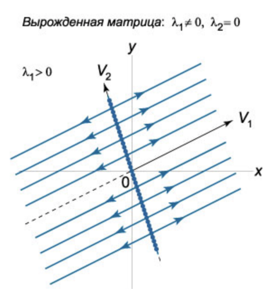
Направление вращения определяется знаком a_21.

6.7 Вырожденная матрица — $det(A) = 0$.

Если матрица является вырожденной, то у нее одно или оба собственных значения равны нулю. При этом возможны следующие частные случаи:



а)



б)

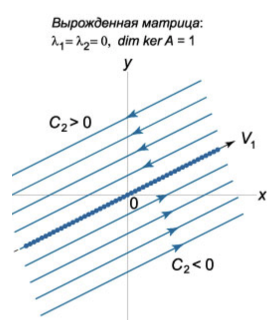


Рис. 6:

7 Линеаризация систем

7.1 Алгоритм линеаризации

Пусть есть система:

$$\begin{cases} \dot{x} = f_1(x, y), \\ \dot{y} = f_2(x, y). \end{cases}$$

1. Найти положения равновесия, то есть разрешить систему $\begin{cases} f_1(x, y) = 0, \\ f_2(x, y) = 0. \end{cases}$.
2. Пусть набор $\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}, ...$ — набор положений равновесия.
3. Для каждого положения равновесия:
   (a) Сделать замену: $\begin{cases} U = x - x_i, \\ V = y - y_i \end{cases}$ и подставить в исходную систему, получив $\begin{cases} \dot{U} = f_{1_i}(U, V), \\ \dot{V} = f_{2_i}(U, V). \end{cases}$
   (b) Разложить функции $f_{1_i}(U, V)$ и $f_{2_i}(U, V)$ в точке $(0, 0)$, избавляясь в процессе разложения от степеней выше 1, то есть $U^2 + U + 3V \longrightarrow U + 3V$.
   (c) В результате предыдущего шага получим систему $\begin{cases} \dot{U} = a_{11}U + a_{12}V, \\ \dot{V} = a_{21}U + a_{22}V. \end{cases}$, матрица данной системы: $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$.
   (d) Найти собственные значения λ_1, λ_2 матрицы A. И, если необходимо, найти собственные векторы:
      i. Для каждого собственного значения λ_i разрешить систему: $\begin{pmatrix} a_{11} - \lambda_i & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} - \lambda_i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = 0$.
      ii. (Для тех, кто разучился к ГОС-у перемножать матрицы): $\begin{cases} v_1(a_{11} - \lambda_i) + v_2 a_1 2 = 0, \\ v_1 a_{12} + v_2(a_{22} - \lambda_i) = 0. \end{cases}$
   (e) Построить фазовую траекторию, с положением равновесия $U = V = 0$.
   (f) Построить фазовую траекторию в изначальных координатах (x, y), то есть сдвинуть то, что получилось на предыдущем шаге на x_i единиц вправо и y_i единиц вверх.

7.2 Разложение по Маклорену

1. $\mathbf{ln(1 + x)} \longrightarrow x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - ....$
2. $\mathbf{arcsin(x)} \longrightarrow x + \frac{x^3}{6} + 3\frac{x^5}{40} + ...$
3. $\mathbf{e^x} \longrightarrow 1 + x + \frac{x^2}{2} + ...$
4. $\mathbf{(1 + x)}^\alpha \longrightarrow 1 + \alpha x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2}x^2 + ...$
5. $\mathbf{sin(x)} \longrightarrow x - \frac{x^3}{6} + ...$
6. $\mathbf{tg(x)} \longrightarrow x + \frac{x^3}{3} + ...$
7. $\mathbf{arccos(x)} \longrightarrow \frac{\pi}{2} - arcsin(x)$
8. $\mathbf{arctg(x)} \longrightarrow x - \frac{x^3}{3} + ...$
9. $\mathbf{sh(x)} \longrightarrow x + \frac{x^3}{6} + ...$
10. $\mathbf{th(x)} \longrightarrow x - \frac{x^3}{3} + ...$
11. $\mathbf{arcsh(x)} \longrightarrow x - \frac{x^3}{6} + ...$
12. $\mathbf{arcth(x)} \longrightarrow x + \frac{x^3}{3} + ...$

8 Некоторые типы дифференциальных уравнений.

8.1 Уравнение Бернулли (I порядок).

$$y' + a(x)y = b(x)y^m, \tag{7}$$

где $a(x)$ и $b(x)$ — непрерывные функции. Если $m = 0$, то имеем дело с линейным дифференциальным уравнением, если $m = 1$, то преобразуется в уравнение с разделяющимися переменными.

В общем случае, когда $m \neq 0$, уравнение Бернулли сводится к линейному дифференциальному уравнению с помощью подстановки:

$$z = y^{1-m}.$$

8.2 Уравнение Риккати (I порядок).

$$y' + b(x)y + d(x)y^2 = f(x), \tag{8}$$

где $b(x), d(x), f(x)$ — непрерывные функции.

Алгоритм решения уравнений Риккати:

1. Найти некоторое частное решение уравнения y_1.
2. Тогда искомым решением будет $y = y_1 + U$, следовательно, задача свелась к поиску U.
3. Подставляем в исходное выражение вместо y и y' выражения $(y_1 + U)$ и $(y_1 + U)'$, и получаем уравнение Бернулли (7).
4. Находим из него U и подставляем в выражение для общего решения.

8.3 Уравнение Эйлера (II порядок).

$$x^2y'' + Axy' + By = 0,\ x > 0, \tag{9}$$

Данное уравнение можно свести к линейному дифференциальному уравнению с постоянными коэффициентами с помощью замены $x = e^t$, в этом случае:

$$y'_x = e^{-t}y'_t,$$
$$y''_{xx} = e^{-2t}(y''_{tt} - y'_t).$$

Подставляя в исходное уравнение, имеем:

$$y''_{tt} + (A-1)y'_t + By = 0.$$

9 Первые интегралы

9.1 Поиск первых интегралов.

Пусть в области $\Omega \subseteq \mathbb{R}^3$ задана автономная система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x} = f_1(x,y,z), \\ \dot{y} = f_2(x,y,z), \\ \dot{z} = f_3(x,y,z). \end{cases} \tag{10}$$

Решения системы 10 можно найти с помощью *первых интегралов*:

Определение (ПИ)

Непрерывно дифференцируемая в области Ω функция $U(x,y,z)$ называется *первым интегралом* системы (10), если $U(\overrightarrow{\varphi}(t)) \equiv Const$ (то есть первый интеграл постоянен вдоль каждой фазовой траектории).

Критерий ПИ

Непрерывно дифференцируемая функция $U(x,y,z)$ является первым интегралом системы (10) $\iff \forall (x,y,z) \in \Omega$ выполнено

$$\frac{\partial U}{\partial x} f_1 + \frac{\partial U}{\partial y} f_2 + \frac{\partial U}{\partial z} f_3 = 0. \tag{11}$$

Количество независимых *ПИ* системы

Если точка $a \in \Omega \subset \mathbb{R}^n$ не является положением равновесия автономной системы, то в ее окрестности существует $\mathbf{n-1}$ независимых первых интегралов.

Поиск *ПИ*

При поиске ПИ применяется так называемый метод интегрирующих комбинаций, который заключается в том, что мы, "глядя"на функции, стоящие в правых частях уравнений, пытаемся подобрать такую комбинацию этих уравнений, которая позволяла бы выделить функции, являющиеся производными от более сложных функций.

Перечислим некоторые способы такого поиска:

1. Запись системы (10) в *симметричном виде*:
$$dt = \frac{dx}{f_1} = \frac{dy}{f_2} = \frac{dz}{f_3}. \tag{12}$$
2. *Свойство равных дробей.* Так как $dx = f_1 dt$, а $dy = f_2 dz$, то $dx + dy = (f_1 + f_2)dt$, из этого принципа вытекает:
$$dt = \frac{d(x+y)}{(f_1+f_2)} = \frac{d(x-y)}{(f_1-f_2)} = \frac{d(x+y+z)}{(f_1+f_2+f_3)} = \dots \tag{13}$$
3. Пусть найден U_1 для системы (12). Тогда при поиске U_2, можно использовать выражение, полученное для U_1, считая его константой, а затем, подставить выражение для U_1 в полученное выражение для U_2.

Пример 1

$$\begin{cases} \dot{x} = z - x + 3y, \\ \dot{y} = z + x - 3y, \\ \dot{z} = -2z. \end{cases}$$

1. Сложим три уравнения: $\dot{x} + \dot{y} + \dot{z} = 0$, следовательно $\boxed{x + y + z = Const = U_1}$.
2. Заметим, что $dt = \frac{d(x-3y+z)}{-4(x-3y+z)} = \frac{dz}{-2z}$, проинтегрировав, получим: $2\ln z = \ln(x-3y+z) + Const$, значит $\boxed{U_2 = \dfrac{z^2}{x-3y+z}}$.

Пример 2

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

1. Выпишем первое и третье уравнения и перемножим их "крест накрест":

$$\frac{dx}{2x^2z^2 + x} = \frac{dz}{z - 4xz^3} \quad \Longrightarrow \quad zdx - 4xz^3dx - 2x^2z^2dz - xdz = 0 \Big| : z^2$$

$$\frac{dx}{dz} - \frac{x}{z^2} - 2(2xzdx + x^2dz) = 0 \quad \Longrightarrow \quad d\left(\frac{x}{z}\right) + d(-2x^2z) = 0 \quad \Longrightarrow \quad \boxed{\frac{x}{z} - 2x^2z = Const = U_1}.$$

2. Выпишем второе и третье уравнения и сократим общую часть в знаменателе:

$$\frac{dy}{y(-4xz^2+1)} = \frac{dz}{z(-4xz^2+1)} \quad \Longrightarrow \quad \frac{dy}{y} = \frac{dz}{z} \quad \Longrightarrow \quad y = z \cdot Const \quad \Longrightarrow \quad \boxed{U_2 = \frac{z}{y}}.$$

Пример 3

$$\begin{cases} \dot{x} = 2xy, \\ \dot{y} = 1 - y^2 - 2xz, \\ \dot{z} = -\frac{y}{x}. \end{cases}$$

1. Выпишем 1 и 3 уравнения, сократим общую часть в знаменателе:

$$\frac{dx}{2xy} = \frac{xdy}{-y} \quad \Longrightarrow \quad \frac{dx}{x^2} = -2dz \quad \Longrightarrow \quad -\frac{1}{x} = -2z + Const \quad \Longrightarrow \quad \boxed{2z - \frac{1}{x} = U_1}.$$

2. Преобразуем второе уравнение, учитывая, что $2xz = U_1x + 1$:

$$\frac{dy}{1 - y^2 - (U_1x + 1)} \quad \Longrightarrow \quad -y^2dx - U_1xdx = 2xydy \quad \Longrightarrow \quad d(y^2x) + d\left(\frac{U_1x^2}{2}\right) = 0$$

$$U_2 = y^2x + U_1\frac{x^2}{2} \quad \Longrightarrow \quad \boxed{U_2 = y^2x + zx^2 - \frac{x}{2}}.$$

9.2 Линейные однородные уравнения в частных производных первого порядка.

Пусть задана система

$$\begin{cases} f_1\frac{\partial U}{\partial x} + f_2\frac{\partial U}{\partial y} + f_3\frac{\partial U}{\partial z} = 0, \\ U = F_1, \quad \text{при } F_2 = 0. \end{cases} \tag{14}$$

Алгоритм решения

1. Выписать характеристическую систему

$$\begin{cases} \dot{x} = f_1, \\ \dot{y} = f_2, \\ \dot{z} = f_3. \end{cases}$$

2. Найти два первых интеграла U_1 и U_2 для этой системы (поиск ПИ: 9.1).

3. Общим решением (14) будет:

$$U = F(U_1, U_2), \text{ где } F \text{ — произвольная непрерывно дифференцируемая функция.}$$

4. Затем, из системы ниже нужно выразить x, y и z через U_1 и U_2 и подставить в выражение $U = F_1$ (второе уравнение системы 14). После того, как мы получим выражение U через U_1 и U_2 (избавившись от x, y и z), нужно подставить выражения для $U_1(x, y, z)$ и $U_2(x, y, z)$ в $U(U_1, U_2)$.

$$\begin{cases} \ldots = U_1, \\ \ldots = U_2, \\ F_2 = 0. \end{cases}$$

Получившееся выражение $U(x, y, z)$ и будет являтся решением задачи Коши (14).

Пример 1

$$\begin{cases} (z - x + 3y)\frac{\partial U}{\partial x} + (z + x - 3y)\frac{\partial U}{\partial y} - 2z\frac{\partial U}{\partial z} = 0, \\ U = \frac{4y}{z}, \text{ при } x - 3y = 0. \end{cases}$$

1. Выпишем характеристическую систему и найдем первые интегралы (поиск первых интегралов данной системы тут: 9.1).
2. Общим решением будет
$$U = F(U_1, U_2) = F\left(x + y + z, \frac{z^2}{x - 3y + z}\right).$$
3. Решим задачу Коши:
   (a) Выразим x, y, z через U_1 и U_2 из системы:
   $$\begin{cases} x + y + z = U_1, \\ \frac{z^2}{x-3y+z} = U_2, \\ x - 3y = 0. \end{cases}$$
   (b) Получим: $y = \frac{1}{4}(U_1 - U_2)$ и $z = U_2$. Подставим найденные выражения в $U(x, y, z) = \frac{4y}{z}$ и получим $U(U_1, U_2)$:
   $$U = \frac{4y}{z} = \frac{U_1 - U_2}{U_2}.$$
   (c) Подставим в полученное выражение $U_1(x, y, z)$ и $U_2(x, y, z)$ (рнайденные на шаге 1) и получим ответ.

10 Вариационное исчисление

10.1 Алгоритм решения варианционной задачи

Рассмотрим функционал

$$J(y) = \int\limits_a^b F(x, y, y')dx, \tag{15}$$

где $a < b \in \mathbb{R}$ — заданные числа, а $F(x, y, y')$ — заданная вещественнозначная непрерывно дифференцируемая функция $\forall x \in [a, b]$ $\forall y \in (-\infty, +\infty)$ $\forall y' \in (-\infty, +\infty)$.

Решим простейшую вариационную задачу:

$$\begin{cases} J(y) = \int\limits_a^b F(x, y, y')dx, \\ y(a) = c_1, \\ y(b) = c_2. \end{cases} \tag{16}$$

1. Сначала нужно найти $y(x)$ (то есть найти экстремаль $y(x)$) из уравнения

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx}\frac{\partial F}{\partial y'} = 0, \tag{17}$$

   причем $\frac{\partial F}{\partial y'}$ ищется при условии того, что y' свободная переменная (то же самое и с y). При нахождении $\frac{d}{dx}$ считаем, что $y' = y'(x)$, $y = y(x)$.

   Чаще всего при решении возникает либо линейное уравнение с постоянными (переменными) коэффициентами, либо уравнение Эйлера (решение уравнения Эйлера тут: 8.3).

2. После того, как выражена экстремаль $y(x)$, нужно найти допустимую экстремаль. Для этого нужно найти константы C_1 и C_2 (которые будут сидеть в выражении для $y(x)$) из граничных условий: $\begin{cases} y(a) = c_1, \\ y(b) = c_2 \end{cases}$ (c_1 и c_2 — заданные в условии числа). Допустимую экстремаль принято обозначать $\hat{y}$.

3. Далее нужно выяснить, дает ли экстремаль $\hat{y}$ минимум, максимум или не является экстремумом вовсе. Для этого нужно определить знак выражения $\Delta J = J(\hat{y} + h) - J(\hat{y})$, где h — произвольная непрерывно дифференцируемая функция на отрезке $[a, b]$, такая, что $h(a) = h(b) = 0$.

   Бывает удобно записать ΔJ в виде:

$$\Delta J = \underbrace{\delta J(\hat{y}, h)}_{=0} + \int\limits_a^b F(x, h, h')dx.$$

   Так же удобно пользоваться результатом следующего интегрирования по частям:

$$\int\limits_a^b f(x)hh'dx = \underbrace{f(x)\frac{h^2}{2}\Bigg|_a^b}_{=0} - \int\limits_a^b \frac{h^2}{2}f'(x)dx.$$

   Иногда полезен следующий результат:

$$\int\limits_a^b h^2(x)dx \leqslant \frac{(b-a)^2}{4}\int\limits_a^b (h')^2dx.$$

4. В случае, если требуется показать, что ΔJ дает разные знаки для разных допустимых h, бывает полезен прием представления h в виде тригонометрической функции, такой, что $h(a) = h(b) = 0$ (пример будет разобран ниже).

5. (**Задача со свободным концом**) В случае, если нужно решить задачу со свободным концом (то есть отсутствием одного граничного условия), то недостающим "граничным"условием, для нахождения констант C_1 и C_2 будет выступать условие:

$$\left.\frac{\partial F}{\partial y'}\right|_{x=b} = 0, \text{ если отсутствует граничное условие на y(b),}$$

$$\left.\frac{\partial F}{\partial y'}\right|_{x=a} = 0, \text{ если отсутствует граничное условие на y(a),}$$

Либо, если граничные условия отсутствуют вообще (задача со свободными концами), то константы находятся из условия

$$\left.\frac{\partial F}{\partial y'}\right|_{x=a} = \left.\frac{\partial F}{\partial y'}\right|_{x=b} = 0.$$

Пример

Показать, что допустимая экстремаль не дает экстремума функционала

$$\begin{cases} J(y) = \int\limits_0^\pi \left[(y')^2 - \frac{9}{4}y^2 + 18y\right] dx, \\ y(0) = 4, \\ y(\pi) = 0. \end{cases}$$

1. Найдем экстремаль:

   - $\frac{\partial F}{\partial y} = -\frac{9}{2}y + 18$,
   - $\frac{\partial F}{\partial y'} = 2y'$,
   - $\frac{d}{dx}\frac{\partial F}{\partial y'} = 2y''$

   $$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx}\frac{\partial F}{\partial y'} = 0 \quad\Longleftrightarrow\quad 4y'' + 9y = 36$$

   Решением однородного будет $y = C_1 \sin\frac{3}{2}x + C_2\cos\frac{3}{2}x$. Частным решением, очевидно, будет ялвятся $y_{\text{ч.}} = 4$. Следовательно:

   $$y = C_1 \sin\frac{3}{2}x + C_2\cos\frac{3}{2}x + 4.$$

2. Найдем допустимую экстремаль:

   $$\begin{cases} y(0) = 4, \\ y(\pi) = 0. \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} C_2 + 4 = 0, \\ -C_1 + 4 = 0. \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} C_1 = 4, \\ C_2 = -4. \end{cases}$$

   Следовательно:

   $$\boxed{\hat{y} = 4\sin\frac{3}{2}x - 4\cos\frac{3}{2}x + 4} \text{ — допустимая экстремаль.}$$

3. Исследуем функционал на экстремум:

   $$\Delta J = \underbrace{\delta J(\hat{y}, h)}_{=0} + \int\limits_0^\pi \left[(h')^2 - \frac{9}{4}h^2\right] dx.$$

   Покажем, что ΔJ меняет свой знак в зависимости от h. Для отрезка $[0,\pi]$ удобнее всего взять тригонометрическую функцию, образующую ноль но концах отрезка. Такой функцией будет $h = \sin kx$, $k \in \mathbb{N}$.

Тогда

$$\Delta J = \int\limits_0^\pi \left[k^2 \cos^2 kx - \frac{9}{4}\sin^2 kx\right] dx = \int\limits_0^\pi \left[k^2 \left(\frac{1+\cos 2kx}{2}\right) - \frac{9}{4}\left(\frac{1-\cos 2kx}{2}\right)\right] dx$$

$$\Delta J = \int\limits_0^\pi \frac{1}{2}(k^2 - \frac{9}{4})dx = \frac{\pi}{2}(k^2 - \frac{9}{4}).$$

Таким образом, если $k^2 > \frac{9}{4}$, то $\Delta J > 0$, а если $k^2 < \frac{9}{4}$, то $\Delta J < 0$. Следовательно экстремума нет.

10.2 Функционалы, зависящие от двух функций.

Рассматривается задача нахождения слвбого экстремума

$$J(y_1, y_2) = \int\limits_a^b F[x, y_1(x), y_2(x), y_1'(x), y_2'(x)]dx, \tag{18}$$

, где F — заданная непрерывно дифференцируемая функция своих аргументов, в классе непрерывно дифференцируемых пар функций $y_1(x)$, $y_2(x)$ на отрезке $[a, b]$. Причем функции удовлетворяют граничным условиям:

$$\begin{cases} y_1(a) = A_1, \\ y_2(a) = A_2, \\ y_1(b) = B_1, \\ y_2(b) = B_2, \end{cases} \tag{19}$$

, где A_1, A_2, B_1, B_2 — заданные в условии числа.

В этом случае экстремали $y_1(x)$ и $y_2(x)$ находятся из системы

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial y_1} - \frac{d}{dx}\frac{\partial F}{\partial y_1'} = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial y_2} - \frac{d}{dx}\frac{\partial F}{\partial y_2'} = 0. \end{cases}$$

Допустимые экстремали $\hat{y_1}$ и $\hat{y_2}$ находятся из граничных условий (19).

10.3 Функционалы, содержащие производные второго порядка.

Рассматривается задача нахождения слабого экстремума

$$J(y) = \int\limits_a^b F[x, y(x), y'(x), y''(x)]dx, \tag{20}$$

, где F — заданная трижды дифференцируемая функция своих аргументов, в классе дважды непрерывно дифференцируемых функций $y(x)$ на отрезке $[a, b]$, удовлетворяющих граничным условиям:

$$\begin{cases} y(a) = A_1, \\ y'(a) = A_2, \\ y(b) = B_1, \\ y'(b) = B_2, \end{cases} \tag{21}$$

, где A_1, A_2, B_1, B_2 — заданные в условии числа.