

Пусть

$$\|A(t)\| = \left\| \begin{array}{cccc} a_{11}(t) & a_{12}(t) & \dots & a_{1n}(t) \\ a_{21}(t) & a_{22}(t) & \dots & a_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1}(t) & a_{n2}(t) & \dots & a_{nn}(t) \end{array} \right\| ,$$
$$\|\vec{x}(t)\| = \left\| \begin{array}{c} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dots \\ x_n(t) \end{array} \right\| , \quad \|\vec{b}(t)\| = \left\| \begin{array}{c} b_1(t) \\ b_2(t) \\ \dots \\ b_n(t) \end{array} \right\| ,$$

тогда систему уравнений (5.1.1) можно записать в так называемом *неразвернутом* виде

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(t)x_j(t) + b_i(t) \quad \forall i = [1, n] ,$$

или же, в еще более компактной, матричной форме

$$\|\dot{\vec{x}}(t)\| = \|A(t)\|\|\vec{x}(t)\| + \|\vec{b}(t)\| . \quad (5.1.2)$$

Справедлива

Теорема 5.1.1 **Общее решение неоднородной системы дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами есть сумма *любого частного* решения этой неоднородной системы и *общего* решения соответствующей однородной системы.**

Введем теперь понятия линейной зависимости и линейной независимости для вектор-функций.

Определение
5.1.2

Вектор-функции $\vec{x}_{(1)}(t), \vec{x}_{(2)}(t), \dots, \vec{x}_{(m)}(t)$ называются *линейно зависимыми* на множестве Ω , если существуют, не равные нулю одновременно, числа $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ такие, что

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i \vec{x}_{(i)}(t) = \vec{0} \quad \forall t \in \Omega. \quad (5.1.3)$$

Вектор-функции $\vec{x}_{(1)}(t), \vec{x}_{(2)}(t), \dots, \vec{x}_{(m)}(t)$ называются *линейно независимыми* на множестве Ω , если из условия

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i \vec{x}_{(i)}(t) = \vec{0} \quad \forall t \in \Omega$$

следует, что $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_m = 0$.

Следует обратить внимание на то, что понятие линейной зависимости вектор-функций $\{\vec{x}_{(1)}(t), \vec{x}_{(2)}(t), \dots, \vec{x}_{(m)}(t)\}$ на некотором множестве $t \in \Omega$ отличается от понятия линейной зависимости векторов, используемого в линейной алгебре.

Задача 5.1.1 Будут ли линейно зависимыми на R вектор-функции

$$\|\vec{x}_{(1)}(t)\| = \left\| \begin{array}{c} 1 \\ 1 \end{array} \right\| \quad \text{и} \quad \|\vec{x}_{(2)}(t)\| = \left\| \begin{array}{c} t \\ t \end{array} \right\| ?$$

Решение. Алгебраические векторы $\left\| \begin{array}{c} 1 \\ 1 \end{array} \right\|$ и $\left\| \begin{array}{c} t \\ t \end{array} \right\|$ очевидно линейно зависимы при любом фиксированном $t \in (-\infty, +\infty)$, поскольку $t \left\| \begin{array}{c} 1 \\ 1 \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c} t \\ t \end{array} \right\|$.

Однако как вектор-функции они линейно независимы, поскольку из

$$\lambda_1 \left\| \begin{array}{c} 1 \\ 1 \end{array} \right\| + \lambda_2 \left\| \begin{array}{c} t \\ t \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} \right\| \quad \forall t$$

(например, при $t = 1$ и $t = 2$) следует, что λ_1 и λ_2 удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 = 0, \\ \lambda_1 + 2\lambda_2 = 0, \end{cases}$$

Решение имеющей единственное (согласно теореме Крамера) решение $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$.

Полезным инструментом, позволяющим делать заключения о линейной зависимости или линейной независимости системы вектор-функций, служит определитель специального вида, называемый определителем Вронского.

Определение
5.1.4

Детерминантом Вронского (или *вронскианом*) набора m -мерных вектор-функций $\{\vec{x}_{(1)}(t), \vec{x}_{(2)}(t), \dots, \vec{x}_{(m)}(t)\}$ называется определитель квадратной матрицы m -го порядка, столбцы которого суть координатные представления этих вектор-функций.

$$W(t) = \det \begin{vmatrix} x_{1(1)} & x_{1(2)} & \dots & x_{1(m)} \\ x_{2(1)} & x_{2(2)} & \dots & x_{2(m)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m(1)} & x_{m(2)} & \dots & x_{m(m)} \end{vmatrix}. \quad (5.1.4)$$

Линейные дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами

Рассмотрим линейное уравнение n -го порядка вида

$$a_n(t)y^{(n)}(t) + a_{n-1}(t)y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1(t)\dot{y}(t) + a_0(t)y(t) = b(t), \quad (5.3.1)$$

где $a_k(t)$ и $b(t)$ непрерывны $\forall k = [0, n] \quad \forall t \in \Omega$ и $a_n(t) \neq 0 \quad \forall t \in \Omega$.

Оно всегда может быть сведено при помощи следующей замены переменных:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= y(t), & x_2(t) &= \dot{y}(t), & x_3(t) &= \ddot{y}(t), & \dots \\ \dots, & & x_{n-1}(t) &= y^{(n-2)}(t), & x_n(t) &= y^{(n-1)}(t) \end{aligned} \quad (5.3.2)$$

к равносильной системе линейных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t), \\ \dots\dots\dots \\ \dot{x}_{n-1}(t) = x_n(t), \\ \dot{x}_n(t) = - \sum_{k=1}^n \frac{a_{k-1}(t)}{a_n(t)} x_k(t) + \frac{b(t)}{a_n(t)}. \end{array} \right. \quad (5.3.3)$$

Или в матричном виде

$$\|\dot{\vec{x}}(t)\| = \|A(t)\|\|\vec{x}(t)\| + \|\vec{b}(t)\| ,$$

где

$$\|A(t)\| = \left\| \begin{array}{cccccc} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -\frac{a_0(t)}{a_n(t)} & -\frac{a_1(t)}{a_n(t)} & -\frac{a_2(t)}{a_n(t)} & \dots & -\frac{a_{n-2}(t)}{a_n(t)} & -\frac{a_{n-1}(t)}{a_n(t)} \end{array} \right\| ,$$

$$\|\vec{b}(t)\| = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ b(t)/a_n(t) \end{array} \right\| , \quad \|\vec{x}(t)\| = \left\| \begin{array}{c} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dots \\ x_{n-1}(t) \\ x_n(t) \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c} y(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dots \\ y^{(n-2)}(t) \\ y^{(n-1)}(t) \end{array} \right\| .$$

Формулы (5.3.2) и (5.3.3) позволяют делать заключения о свойствах уравнений вида (5.3.1) и их решений, используя результаты, полученные для систем линейных уравнений.

Рассмотрим однородное линейное уравнение n -го порядка вида

$$a_n(t)y^{(n)}(t) + a_{n-1}(t)y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1(t)\dot{y}(t) + a_0(t)y(t) = 0, \quad (5.3.4)$$

Вид общего решения однородного уравнения (5.3.4) описывает

Теорема 5.3.1 Пусть функции $y_{(1)}(t), y_{(2)}(t), \dots, y_{(n)}(t)$ суть линейно независимые частные решения однородного уравнения (5.3.4). Тогда общее решение этого уравнения дается формулой

$$y(t) = \sum_{k=1}^n C_k y_{(k)}(t),$$

где C_1, C_2, \dots, C_n — произвольные постоянные.

Определение 5.3.1 Фундаментальной системой решений уравнения (5.3.4) называется совокупность любых n его линейно независимых частных решений.

Учитывая замену переменных (5.3.2), для уравнения (5.3.1) можно дать

Определение
5.3.2

Вронскианом набора $n-1$ раз непрерывно дифференцируемых функций $y_{(1)}(t), y_{(2)}(t), \dots, y_{(n)}(t)$ называется

$$\det \begin{vmatrix} y_{(1)}(t) & y_{(2)}(t) & \dots & y_{(n)}(t) \\ \dot{y}_{(1)}(t) & \dot{y}_{(2)}(t) & \dots & \dot{y}_{(n)}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{(1)}^{(n-1)}(t) & y_{(2)}^{(n-1)}(t) & \dots & y_{(n)}^{(n-1)}(t) \end{vmatrix},$$

обозначаемый, как и раньше, $W(t)$.

Перечислим теперь свойства решений однородного уравнения (5.3.4), описываемые с помощью понятия вронскиана.

Теорема 5.3.3 Пусть функции $y_{(1)}(t), y_{(2)}(t), \dots, y_{(n)}(t)$ определены и $n - 1$ раз непрерывно дифференцируемы $\forall t \in \Omega$ и $W(t)$ – их вронскиан. Тогда

- 1°. Если $y_{(1)}(t), y_{(2)}(t), \dots, y_{(n)}(t)$ линейно зависимы на Ω , то $W(t) \equiv 0$ на Ω .
- 2°. Если вронскиан $W(t) \neq 0$ на Ω , то функции $y_{(1)}(t), y_{(2)}(t), \dots, y_{(n)}(t)$ линейно независимы на Ω .
- 3°. Пусть $y_{(1)}(t), y_{(2)}(t), \dots, y_{(n)}(t)$ суть частные решения однородного уравнения (5.3.4). Они линейно зависимы тогда и только тогда, когда и их вронскиан тождественно равен нулю, то есть $W(t) \equiv 0$ на Ω . Для их линейной независимости необходимо и достаточно, чтобы $W(t) \neq 0$ на Ω , т. е. $\forall t_0 \in \Omega : W(t_0) \neq 0$.
- 4°. Если $y_{(1)}(t), y_{(2)}(t), \dots, y_{(n)}(t)$ частные решения однородного уравнения (5.3.4), то $\forall t_0, t \in \Omega$ справедлива формула Лиувилля–Остроградского

$$W(t) = W(t_0) \exp \left(- \int_{t_0}^t \frac{a_{n-1}(u)}{a_n(u)} du \right).$$

Как и в случае неоднородной системы (5.3.3), частное решение неоднородного уравнения может быть найдено методом *вариации постоянных*.

Теорема 5.3.5 Пусть частные решения однородного уравнения (5.3.4) $\{y_{(1)}(t), y_{(2)}(t), \dots, y_{(n)}(t)\}$ образуют фундаментальную систему, тогда неоднородное уравнение (5.3.1) имеет частное решение вида

$$y^*(t) = \sum_{k=1}^n C_k(t) y_{(k)}(t), \quad (5.3.9)$$

где непрерывно дифференцируемые функции $C_k(t)$, $k = [1, n]$ определяются как квадратуры решений системы линейных уравнений

$$\left\| \begin{array}{cccc} y_{(1)}(t) & y_{(2)}(t) & \dots & y_{(n)}(t) \\ \dot{y}_{(1)}(t) & \dot{y}_{(2)}(t) & \dots & \dot{y}_{(n)}(t) \\ \ddot{y}_{(1)}(t) & \ddot{y}_{(2)}(t) & \dots & \ddot{y}_{(n)}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{(1)}^{(n-1)}(t) & y_{(2)}^{(n-1)}(t) & \dots & y_{(n)}^{(n-1)}(t) \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} \dot{C}_1(t) \\ \dot{C}_2(t) \\ \dot{C}_3(t) \\ \dots \\ \dot{C}_n(t) \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ \frac{b(t)}{a_n(t)} \end{array} \right\| \quad (5.3.10)$$

Проиллюстрируем применение изложенного метода примерами.

Задача 01. Исследовать на линейную зависимость и линейную независимость на отрезке $[-1, 1]$ системы функций

$$\begin{array}{l} 1) \{ \cos x \quad ; \quad \sin x \} \\ 2) \{ \quad x^2 \quad ; \quad x^2 \operatorname{sgn} x \} \end{array}$$

Решение :

1) Вронскиан для первого набора функций будет

$$W(x) = \begin{vmatrix} \cos x & \sin x \\ -\sin x & \cos x \end{vmatrix} = \cos^2 x + \sin^2 x = 1.$$

Поскольку он не равен тождественно нулю, то первый набор функций линейно независимый.

2) В этом случае вронсиан

$$W(x) = \begin{vmatrix} x^2 & x^2 \operatorname{sgn} x \\ 2x & 2x \operatorname{sgn} x \end{vmatrix} = 2x^3 \operatorname{sgn} x - 2x^3 \operatorname{sgn} x = 0.$$

Он равен тождественно равен нулю, но делать каких-либо выводов, исходя только из этого факта, нельзя.

Воспользуемся определением линейной независимости. Пусть в каждой точке отрезка $[-1, 1]$ верно равенство

$$\lambda_1 x^2 + \lambda_2 x^2 \operatorname{sgn} x = 0.$$

Для $x = 1$ оно имеет вид $\lambda_1 + \lambda_2 = 0$, а для $x = -1$ будет $\lambda_1 - \lambda_2 = 0$.

По теореме Крамера система линейных уравнений

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 = 0, \\ \lambda_1 - \lambda_2 = 0 \end{cases}$$

имеет решение и притом единственное.

С другой стороны, в силу своей однородности, эта система имеет тривиальное решение. Значит, $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ и ничего другого быть не может.

Следовательно, вторая система функций линейно независимая.

Задача 02. Пусть $y_1(x) = 1$, $y_2(x) = x$ и $y_3(x) = x^2$ суть три частных решения некоторого линейного неоднородного уравнения второго порядка. Найти его общее решение.

Решение :

В силу линейности уравнения функции $y_4(x) = y_2(x) - y_1(x) = x - 1$ и $y_5(x) = y_3(x) - y_1(x) = x^2 - 1$ будут линейно независимыми частными решениями однородного уравнения, образующие для него фундаментальную систему, поскольку вронскиан этого набора функций $\{y_4(x); y_5(x)\}$ равен

$$W(x) = \begin{vmatrix} x - 1 & x^2 - 1 \\ 1 & 2x \end{vmatrix} = (x - 1)^2.$$

Тогда общее решение неоднородного уравнения будет

$$y(x) = C_1(x - 1) + C_2(x^2 - 1) + 1.$$

Задача 03. Составить линейное однородное уравнение (минимально возможного порядка) имеющее следующие частные решения $y_1(x) = x$ и $y_2(x) = e^x$.

Решение:

Функции $y_1(x) = x$ и $y_2(x) = e^x$ будут линейно независимыми частными решениями искомого однородного уравнения, поскольку их вронскиан равен

$$W(x) = \begin{vmatrix} x & e^x \\ 1 & e^x \end{vmatrix} = e^x(x - 1) \neq 0.$$

Пусть искомое уравнение имеет вид $a_2(x)y'' + a_1(x)y' + a_0(x)y = 0$. Тогда функции $a_0(x)$, $a_1(x)$ и $a_2(x)$, в силу условия задачи должны удовлетворять системе уравнений

$$\begin{cases} a_2(x) + a_1(x) + a_0(x) = 0, \\ a_1(x) + xa_0(x) = 0, \\ \frac{Kx}{x-1} = -\frac{a_1(x)}{a_2(x)}. \end{cases}$$

Причем третье уравнение вытекает из формулы Лиувилля-Остроградского.

Действительно, если $W(t_0) = 1/K$, то

$$\begin{aligned} W(t) &= W(t_0) \exp \left(- \int_{t_0}^t \frac{a_1(u)}{a_2(u)} du \right) \implies \\ \implies K e^x (x - 1) &= \exp \left(- \int_{t_0}^t \frac{a_1(u)}{a_2(u)} du \right) \implies \frac{Kx}{x - 1} = - \frac{a_1(x)}{a_2(x)}. \end{aligned}$$

В итоге, решив полученную систему уравнений, мы получаем уравнение

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

Покажите самостоятельно, что, если бы в условии задачи отсутствовало слово *однородное*, то ее решение имело бы вид:

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

Задача Найти общее решение уравнения

5.3.1

$$t^2\ddot{y} - t(t+3)\dot{y} + (2t+3)y = t^4 \quad \forall t > 0.$$

Решение :

Поскольку общих регулярных методов отыскания частных решений уравнений типа

$$t^2\ddot{y} - t(t+3)\dot{y} + (2t+3)y = 0 \quad (5.3.11)$$

не существует, попробуем подобрать одно из частных решений в виде алгебраического многочлена степени m , то есть в виде $y(t) = t^m + \dots$.

Подставляя это выражение в (5.3.11), получаем

$$(-m+2)t^{m+1} + \dots = 0$$

и, приравняв нулю коэффициент при t^{m+1} , найдем, что $m = 2$. Значит, частное решение имеет смысл искать в виде $y(t) = t^2 + pt + q$. Если эту формулу подставить снова в (5.3.11), то уравнение примет вид

$$t^2(p-1) + q(2t+3) = 0,$$

откуда следует, что $p = 1$ и $q = 0$, то есть, одно частное решение уравнения (5.3.11) найдено: $y_{(1)}(t) = t^2 + t$.

Поскольку найденное частное решение не равно тождественно нулю, то для отыскания $y_{(2)}(t)$ – второго частного решения уравнения (5.3.11) – можно использовать формулу Лиувилля–Остроградского, приведенную в пункте 4° теоремы 5.3.3. Запишем эту формулу в виде

$$\det \begin{vmatrix} t^2 + t & y_{(2)}(t) \\ 2t + 1 & \dot{y}_{(2)}(t) \end{vmatrix} = C \exp \left(\int_{t_0}^t \frac{u + 3}{u} du \right),$$

что (покажите это самостоятельно!) сводится к дифференциальному уравнению

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{y_{(2)}(t)}{t^2 + t} \right) = \frac{Cte^t}{(t + 1)^2}.$$

Затем, используя равенство

$$\frac{d}{dt} \frac{e^t}{t + 1} = \frac{te^t}{(t + 1)^2},$$

получаем второе частное решение $y_{(2)}(t) = te^t$.

Пара частных решений $y_{(1)}(t)$ и $y_{(2)}(t)$ образует фундаментальную систему для уравнения (5.3.11). Поэтому общее решение этого однородного уравнения имеет вид

$$y(t) = C_1(t^2 + t) + C_2te^t,$$

где C_1 и C_2 – произвольные вещественные константы.

Найдем теперь частное решение исходного *неоднородного* уравнения, в виде

$$y^*(t) = C_1(t)(t^2 + t) + C_2(t)te^t, \quad (5.3.12)$$

то есть, используя метод вариации постоянных.

В решаемой задаче система линейных уравнений (5.3.10) записывается так

$$\begin{vmatrix} t^2 + t & te^t \\ 2t + 1 & (t + 1)e^t \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{C}_1(t) \\ \dot{C}_2(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ t^2 \end{vmatrix}$$

Ее решениями являются функции $\dot{C}_1(t) = -1$ и $\dot{C}_2(t) = (t + 1)e^{-t}$. Соответственно, $C_1(t) = -t$ и $C_2(t) = -(t + 2)e^{-t}$.

Теперь находим частное решение неоднородного уравнения по формуле (5.3.12)

$$y^*(t) = -t^3 - 2(t^2 + t),$$

что позволяет записать общее решение исходного неоднородного уравнения в виде

$$y(t) = C_1(t^2 + t) + C_2te^t - t^3,$$

где C_1 и C_2 – произвольные вещественные константы.