

Metode rješavanja sustava običnih diferencijalnih jednažbi

Turčinović, Endi

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:392152>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-23**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**METODE RJEŠAVANJA SUSTAVA OBIČNIH
DIFERENCIJALNIH JEDNADŽBI**

Rijeka, rujan 2024.

Endi Turčinović
0069079245

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**METODE RJEŠAVANJA SUSTAVA OBIČNIH
DIFERENCIJALNIH JEDNADŽBI**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Ivan Dražić

Rijeka, rujan 2024.

Endi Turčinović
0069079245

Rijeka, 20. ožujka 2024.

Zavod: **Zavod za matematiku, fiziku i strane jezike**
Predmet: **Inženjerska matematika ET**
Grana: **1.01.07 primijenjena matematika i matematičko modeliranje**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Endi Turčinović (0069079245)**
Studij: **Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike**

Zadatak: **Metode rješavanja sustava običnih diferencijalnih jednadžbi**

Opis zadatka:

U ovom radu potrebno je uvesti problem početnog problema za sustav običnih diferencijalnih jednadžbi, sa specijalnim naglaskom na klasu linearnih sustava. Potrebno je opisati različite metode za analitičko rješavanje inicijalnog problema kao što su metoda supstitucije, operatorska i matična metoda te istaknuti njihove specifičnosti. U praktičnom dijelu rada potrebno je primijeniti opisane metode na problemima iz inženjerstva koji su modelirani sustavima običnih diferencijalnih jednadžbi.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2024.

Mentor:



izv. prof. dr. sc. Ivan Dražić

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



prof. dr. sc. Dubravko Franković

IZJAVA

Sukladno članku 7. Stavku 1. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku sveučilišnih prijediplomskih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci od 4. travnja 2023., izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku preuzetom dana 20. ožujka 2024.

Rijeka, 7. rujna 2024.

Endi Turčinović

Sadržaj

| | |
|--|-----------|
| 1. Uvod | 2 |
| 2. Obične diferencijalne jednačbe | 3 |
| 2.1. Pojam obične diferencijalne jednačbe i njenog rješenja | 3 |
| 2.2. Praktična opravdanost običnih diferencijalnih jednačbi | 4 |
| 2.3. Opće i partikularno rješenje | 5 |
| 2.4. Rješavanje obične diferencijalne jednačbe | 7 |
| 3. Obične linearne diferencijalne jednačbe s konstantnim koeficijentima | 9 |
| 3.1. Homogene jednačbe | 9 |
| 3.2. Nehomogene jednačbe | 11 |
| 3.2.1. Metoda neodređenih koeficijenata | 12 |
| 3.2.2. Metoda varijacije konstanti | 15 |
| 4. Sustavi običnih diferencijalnih jednačbi | 17 |
| 4.1. Kanonska forma sustava običnih diferencijalnih jednačbi | 17 |
| 4.2. Linearni i nelinearni sustavi običnih diferencijalnih jednačbi | 18 |
| 4.3. Autonomni i neautonomni sustavi običnih diferencijalnih jednačbi | 20 |
| 5. Rješavanje sustava običnih diferencijalnih jednačbi metodom supstitucije | 22 |
| 6. Rješavanje sustava običnih diferencijalnih jednačbi matičnom metodom | 30 |
| 7. Laplaceova transformacija | 33 |
| 7.1. Rješavanje običnih diferencijalnih jednačbi korištenjem Laplaceove transformacije | 34 |
| 7.2. Rješavanje sustava diferencijalnih jednačbi korištenjem Laplaceove transformacije | 36 |
| 8. Sustavi običnih diferencijalnih jednačbi u inženjerstvu | 38 |
| 9. Zaključak | 41 |
| Literatura | 42 |
| Sažetak i ključne riječi | 43 |
| Summary and key words | 44 |

1. Uvod

Završni rad obrađuje područje rješavanja sustava diferencijalnih jednačbi te njihovu primjenu u inženjerstvu. Diferencijalne jednačbe predstavljaju jedan od temeljnih matematičkih alata u modeliranju fizičkih pojava, posebno u području inženjerstva i prirodnih znanosti. Njihova primjena omogućava opisivanje dinamike sustava kroz promjene koje se događaju u vremenu ili prostoru. U elektrotehnici, diferencijalne jednačbe igraju ključnu ulogu u analizi i projektiranju električnih i elektroničkih sustava, od jednostavnih strujnih krugova do složenih sustava upravljanja i telekomunikacija. U gotovo svim područjima znanosti i inženjerstva, diferencijalne jednačbe su ključne za formuliranje i rješavanje problema koji uključuju varijable koje su međusobno povezane putem derivacija.

Kroz ovaj završni rad, cilj je istražiti i prikazati kako se diferencijalne jednačbe koriste za modeliranje i rješavanje problema. Rad će obuhvatiti osnovne tipove diferencijalnih jednačbi, metode njihovog rješavanja uz neke konkretne primjere iz različitih područja inženjerstva.

U prvom dijelu rada bavimo se osnovnim pojmovima iz teorije običnih diferencijalnih jednačbi. Definiramo opće i partikularno rješenje te navodimo neke temeljne metode njihova rješavanja kao što je primjerice separacija varijabli. Također pokazujemo opravdanost primjene običnih diferencijalnih jednačbi.

U trećem poglavlju uvodimo obične linearne diferencijalne jednačbe s konstantnim koeficijentima s naglaskom na metode njihova rješavanja. Naime, ovaj tip diferencijalnih jednačbi najčešće se pojavljuje kod sustava običnih diferencijalnih jednačbi i ključan je za njihovo rješavanje.

U četvrtom poglavlju definiramo sustave običnih diferencijalnih jednačbi i navodimo neke njihove klasifikacije, dok se u petom i šestom poglavlju bavimo tehnikama rješavanja sustava običnih diferencijalnih jednačbi, pritom stavljajući naglasak na metodu supstitucije i matičnu metodu. U sedmom poglavlju uvodimo Laplaceove transformacije i pokazujemo kako se one koriste kod rješavanja sustava običnih diferencijalnih jednačbi, a u zadnjem poglavlju navodimo neke konkretne primjene sustava običnih diferencijalnih jednačbi u inženjerstvu.

2. Obične diferencijalne jednačbe

Glavna tema ovog rada su sustavi običnih diferencijalnih jednačbi i metode njihova rješavanja. Sustavi običnih diferencijalnih jednačbi sastoje se od više običnih diferencijalnih jednačbi koje ćemo u ovom poglavlju upoznati.

2.1. Pojam obične diferencijalne jednačbe i njenog rješenja

Pri rješavanju mnogih problema potrebno je naći nepoznatu funkciju $y(x)$ koja mjeri kvantitativnu stranu neke pojave, ako je pritom poznata izvjesna veza nezavisne promjenljive x , nepoznate funkcije $y(x)$ i njenih derivacija $y', y'', \dots, y^{(n)}$ dana jednačbom

$$F(x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0, \quad (2.1)$$

gdje je F zadana funkcija. Svaka se jednačba ovog oblika, koja sadrži barem jednu derivaciju, naziva obična diferencijalna jednačba.

Primjer 2.1. Izraz

$$y'''(x) + 2yxy'' + 3y = \sin x \quad (2.2)$$

primjer je obične diferencijalne jednačbe.

Osim običnih diferencijalnih jednačbi imamo i parcijalne diferencijalne jednačbe koja uključuje parcijalne derivacije. Za razliku od obične diferencijalne jednačbe, gdje nepoznata funkcija ovisi samo o jednoj varijabli, u parcijalnoj diferencijalnoj jednačbi nepoznata funkcija ovisi o više varijabli.

Primjer 2.2. Izraz

$$u_x(x, y) + u_y(x, y) = \sin(x + y) \quad (2.3)$$

primjer je parcijalne diferencijalne jednačbe.

Red diferencijalne jednačbe je red najviše derivacije koja se u jednačbi pojavljuje. Tako je primjerice jednačba iz primjera 2.1 obična diferencijalna jednačba trećeg reda, a jednačba iz primjera 2.2 parcijalna diferencijalna jednačba prvog reda.

Rješenje ili integral diferencijalne jednačbe (2.1) je svaka funkcija $y(x)$ koja zadovoljava tu jednačbu, dok se graf funkcije $y(x)$ naziva integralna krivulja. Riješiti jednačbu znači naći sva njezina rješenja.

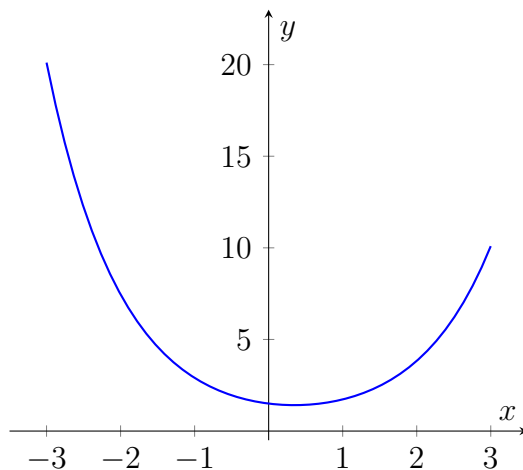
Primjer 2.3. Funkcija zadana s

$$y(x) = e^{-x} + \frac{1}{2}e^x \quad (2.4)$$

jedno je rješenje obične diferencijalne jednačine

$$y' + y = e^x. \quad (2.5)$$

Na sljedećoj slici prikazan je integralna krivulja dane diferencijalne jednačine.



Slika 2.1. Jedna integralna krivulja diferencijalne jednačine $y' + y = e^x$.

2.2. Praktična opravdanost običnih diferencijalnih jednačini

Diferencijalne jednačine susrećemo u različitim područjima znanosti. Pomoću njih zapisane su razne matematičke formule, a posebno fizikalni zakoni. Tako se primjerice u mehanici često koristi drugi Newtonov zakon zapisan u obliku sljedeće diferencijalne jednačine:

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F} \quad (2.6)$$

gdje je m masa tijela, \vec{v} brzina, a \vec{F} sila koja uzrokuje gibanje. Posebno, ako je $m = \text{konst.}$ (kao što je najčešće slučaj) biti će

$$m\dot{\vec{v}} = \vec{F}, \quad (2.7)$$

ili

$$m\ddot{\vec{s}} = \vec{F}, \quad (2.8)$$

gdje je \vec{s} položaj, a točkasti operator predstavlja derivaciju po vremenskoj varijabli t .

U toplini se često koristi Newtonov zakon hlađenja koji glasi

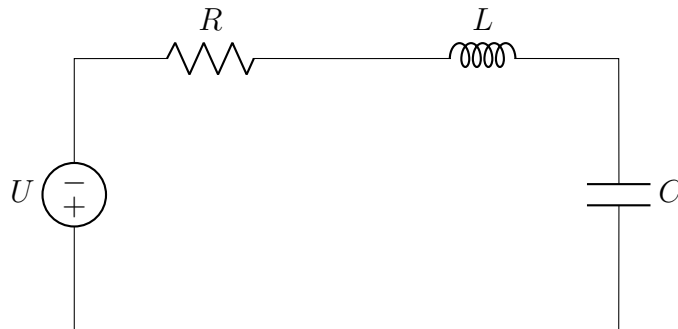
$$\frac{dT}{dt} = k(T - T_{ok}), \quad (2.9)$$

gdje je T temperatura tijela, T_{ok} temperatura okoline i k koeficijent koji se za različite materijale utvrđuje eksperimentalno.

Česta je i uporaba tzv. populacijske jednadžbe koja izražava činjenicu da je brzina promjene izvjesne populacije srazmjerna momentalnom broju jedinki $y(t)$, a glasi

$$\frac{dy}{dt} = ky. \quad (2.10)$$

Kao primjer iz elektrotehnike možemo uzeti jedan običan RLC krug prikazan na slici 2.2.



Slika 2.2. Serijski RLC krug.

Prema Kirchhoffovom zaknu jednadžba tog kruga glasi

$$u_R(t) + u_L(t) + u_C(t) = U, \quad (2.11)$$

gdje su naponi s lijeve strane redom naponi na otporniku, zavojnici i kondenzatoru.

Ovaj se izraz može zapisati u obliku diferencijalno-integralne jednadžbe:

$$Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t)dt = U, \quad (2.12)$$

u kojoj nam R predstavlja omski otpor otpornika, L induktivitet zavojnice, C kapacitet kondenzatora, dok je $i(t)$ struja u strujnom krugu, a U vrijednost napona izvora.

2.3. Opće i partikularno rješenje

Neposrednim uvrštavanjem možemo vidjeti da osim navedenog rješenja u primjeru 2.3 i funkcija

$$y(x) = 2e^{-x} + \frac{1}{2}e^x \quad (2.13)$$

je također jedno rješenje zadane jednadžbe. Štoviše, sve funkcije oblika

$$y(x) = Ce^{-x} + \frac{1}{2}e^x \quad (2.14)$$

za sve vrijednosti $C \in \mathbb{R}$ rješenja su zadane diferencijalne jednadžbe.

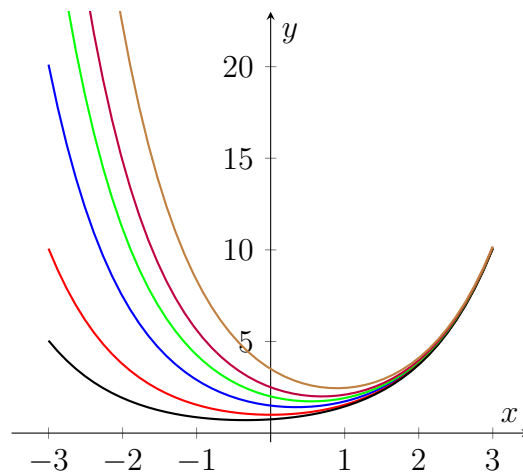
Ovo nam pokazuje da diferencijalna jednadžba prvog reda ima beskonačno mnogo rješenja, a izraz koji obuhvaća sva ta rješenja zove se opće rješenje. Formalno funkcija

$$x \mapsto y(x, C), \quad (2.15)$$

gdje je C proizvoljna konstanta naziva se opće rješenje diferencijalne jednačbe ??, ako je funkcija $y(x, C)$ rješenje diferencijalne jednačbe za svaku vrijednost konstante C .

Posebno ili partikularno rješenje diferencijalne jednačbe je svako rješenje koje je moguće dobiti iz općeg uz odgovarajući izbor konstante C . Tako je funkcija u primjeru 2.3 partikularno rješenje dobiveno uvrštavanjem vrijednosti konstante $C = 1$.

Geometrijski gledano, opće rješenje linearne jednačbe je jednoparametarski skup krivulja za koje smo rekli da se zovu integralne krivulje, a svaka integralna krivulja predstavlja jedno partikularno rješenje. Opće rješenje obične diferencijalne jednačbe iz primjera 2.3 prikazano je na sljedećoj slici.



Slika 2.3. Grafički prikaz općeg rješenja diferencijalne jednačbe $y' + y = e^x$.

Opće rješenje osim u eksplicitnom obliku $y(x, C)$ može biti dano implicitnom funkcijom

$$\phi(x, y, C) = 0, \quad (2.16)$$

dok će u nekim slučajevima biti predloženo parametarskim jednačbama

$$x = x(p, C), y = y(p, C) \quad (2.17)$$

gdje je p parametar.

Postavlja se pitanje kako se bira konstanta C koja definira partikularno rješenje. To radimo nametanjem dodatnih uvjeta koji se obično nazivaju početni uvjeti. Broj uvjeta koje treba nametnuti ovisi o redu jednačbe, odnosno za definiranje partikularnog rješenja obično treba onoliko uvjeta koliki je red jednačbe. Problem koji se sastoji od diferencijalne jednačbe i početnog uvjeta naziva se Cauchyjev problem.

Primjer 2.4. Neka je zadan sljedeći Cauchyjev problem:

$$\begin{cases} y' + 2y = 3, \\ y(0) = 1. \end{cases} \quad (2.18)$$

Opće rješenje ove diferencijalne jednačbe dano je izrazom:

$$y(x) = \frac{3}{2} + Ce^{-2x}. \quad (2.19)$$

Odredimo sada partikularno rješenje koje zadovoljava zadani početni uvjet. Uvrštavanjem uvjeta u opće rješenje dobivamo:

$$1 = \frac{3}{2} + Ce^0, \quad (2.20)$$

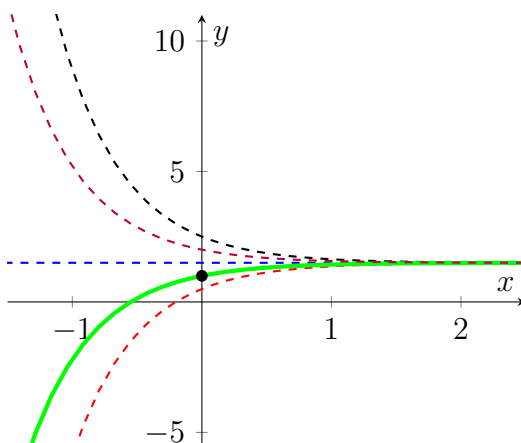
$$1 = \frac{3}{2} + C, \quad (2.21)$$

$$C = 1 - \frac{3}{2} = -\frac{1}{2}. \quad (2.22)$$

Dakle, traženo partikularno rješenje je:

$$y(x) = \frac{3}{2} - \frac{1}{2}e^{-2x}. \quad (2.23)$$

Rješenje ovog problema prikazano je na sljedećoj slici.



Slika 2.4. Grafički prikaz rješenja zadanog Cauchyjevog problema s označenim početnim uvjetom. Isprekidane linije predstavljaju integralne krivulje koje ne zadovoljavaju početni uvjet.

2.4. Rješavanje obične diferencijalne jednačbe

Rješavanje običnih diferencijalnih jednačbi je izuzetno kompleksan zadatak zbog širokog spektra mogućih oblika tih jednačbi i ponašanja njihovih rješenja. U praksi se susrećemo s raznim vrstama običnih diferencijalnih jednačbi, od jednostavnih linearnih jednačbi koje se mogu riješiti osnovnim metodama, do vrlo složenih nelinearnih jednačbi za koje često ne postoji eksplisitno rješenje.

Zbog te raznolikosti, razvijen je čitav niz metoda za rješavanje običnih diferencijalnih jednačbi. Ove metode uključuju analitičke pristupe, koji teže pronalazaženju egzaktnih rješenja, te numeričke tehnike, koje omogućuju aproksimaciju rješenja kada je analitički pristup nepraktičan

ili nemoguć. Svaka od ovih metoda ima svoje prednosti i ograničenja, ovisno o prirodi jednadžbe koja se rješava.

Svakako treba naglasiti da univerzalna metoda rješavanja običnih diferencijalnih jednadžbi ne postoji i da rješavanje običnih diferencijalnih jednadžbi zahtijeva ne samo poznavanje teorije već i praktične vještine u odabiru odgovarajuće metode ovisno o specifičnostima problema. Ova raznolikost metoda i složenost problema čini područje diferencijalnih jednadžbi jednim od najbogatijih i najdinamičnijih polja u matematici i primijenjenim znanostima.

Pokažimo sada na primjeru jednu jednostavnu metodu rješavanja obične diferencijalne jednadžbe koja se zove metoda direktne integracije.

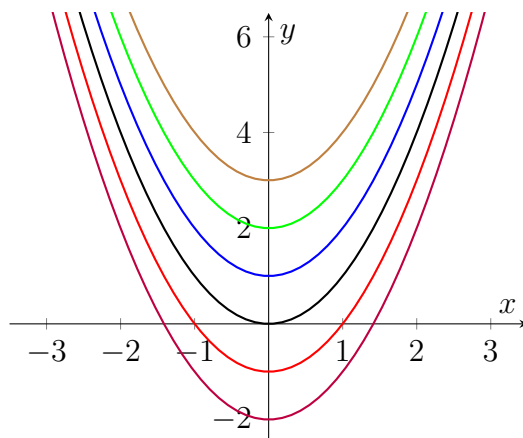
Primjer 2.5. Riješimo običnu diferencijalnu jednadžbu zadanu s

$$y' = 2x. \quad (2.24)$$

Integriranjem obje strane ove jednadžbe dobiva se

$$y = x^2 + C, \quad (2.25)$$

što je opće rješenje zadane diferencijalne jednadžbe. Skup integralnih krivulja koji odgovara ovom rješenju prikazan je na sljedećoj slici.



Slika 2.5. Grafički prikaz općeg rješenja diferencijalne jednadžbe $y' = 2x$.

3. Obične linearne diferencijalne jednađbe s konstantnim koeficijentima

Jedna od metoda rješavanja sustava običnih diferencijalnih jednađbi jest metoda supstitucije u kojoj sustav diferencijalnih jednađbu svodimo na jednu diferencijalnu jednađbu višeg reda. U ovom radu uglavnom se bavimo linearnim sustavima s konstantnim koeficijentima koji će se onda svoditi na linearne diferencijalne jednađbe s konstantnim koeficijentima koje obrađujemo u ovom poglavlju.

Obična diferencijalna jednađba s konstantnim koeficijentima je diferencijalna jednađba koja se može zapisati u obliku

$$a_n y^{(n)}(x) + a_{n-1} y^{(n-1)}(x) + \dots + a_1 y'(x) + a_0 y(x) = g(x), \quad (3.1)$$

gdje su a_0, a_1, \dots, a_n konstante, $y(x)$ je nepoznata funkcija, a $g(x)$ je poznata funkcija nezavisne varijable x . Ako je $g(x) = 0$, jednađba je homogena, dok je u suprotnom nehomogena.

3.1. Homogene jednađbe

Homogena diferencijalna jednađba s konstantnim koeficijentima je oblika

$$a_n y^{(n)}(x) + a_{n-1} y^{(n-1)}(x) + \dots + a_1 y'(x) + a_0 y(x) = 0, \quad (3.2)$$

gdje su a_0, a_1, \dots, a_n konstante.

Da bismo riješili homogenu jednađbu, pretpostavljamo njeno rješenje u obliku

$$y(x) = e^{\lambda x}. \quad (3.3)$$

Uvrštavanjem (3.3) u (3.2) dobivamo:

$$a_n \lambda^n e^{\lambda x} + a_{n-1} \lambda^{n-1} e^{\lambda x} + \dots + a_1 \lambda e^{\lambda x} + a_0 e^{\lambda x} = 0. \quad (3.4)$$

Budući da $e^{\lambda x}$ nije nikada jednako nuli, možemo (??) podijeliti s $e^{\lambda x}$ i dobiti algebarsku jednađbu:

$$a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_1 \lambda + a_0 = 0, \quad (3.5)$$

koja se u tom kontekstu naziva karakteristična jednađba.

Rješenja (korijeni) karakteristične jednađbe (3.5) su

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \quad (3.6)$$

i oni definiraju rješenja diferencijalne jednađbe (3.2). Naglasimo da tih korijena ima n ukoliko je n stupanj polinoma koji definira karakterističnu jednađbu, ali da među tih n korijena može biti

istih. Ako se neki korijen pojavljuje više puta za njega kažemo da je korijen višestrukosti m , gdje je m broj ponavljanja tog korijena.

Ako su svi korijeni različiti, opće rješenje jednadžbe (3.2) je

$$y(x) = C_1 e^{\lambda_1 x} + C_2 e^{\lambda_2 x} + \dots + C_n e^{\lambda_n x}. \quad (3.7)$$

Ako su neki korijeni višestruki, recimo ako je λ_1 korijen višestrukosti m , tada rješenja uključuju i polinom varijable x :

$$(C_1 + C_2 x + \dots + C_m x^{m-1}) e^{\lambda_1 x}. \quad (3.8)$$

Napomenimo da je (3.8) onaj dio izraza (3.7) koji se odnosi na korijene vrijednosti λ_1 .

Ako su korijeni realni brojevi, rješenja navodimo u obliku eksponencijalnih funkcija kako je prikazano. Međutim, ako su korijeni kompleksni brojevi, recimo $\lambda = \alpha \pm i\beta$, tada rješenje navodimo u obliku:

$$y(x) = e^{\alpha x} (C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)). \quad (3.9)$$

Pokažimo sada na nekoliko primjera kako se rješavaju ovakve jednadžbe.

Primjer 3.1. *Riješimo jednadžbu*

$$y^{IV} - 6y''' + 11y'' - 6y' = 0. \quad (3.10)$$

Karakteristična jednadžba ove diferencijalne jednadžbe je oblika

$$\lambda^4 - 6\lambda^3 + 11\lambda^2 - 6\lambda = 0, \quad (3.11)$$

odnosno

$$\lambda(\lambda - 1)(\lambda - 2)(\lambda - 3) = 0. \quad (3.12)$$

Prema tome, korijeni karakteristične jednadžbe su:

$$\lambda_1 = 0, \quad \lambda_2 = 1, \quad \lambda_3 = 2, \quad \lambda_4 = 3. \quad (3.13)$$

Budući su svi korijeni različiti, opće rješenje diferencijalne jednadžbe bit će linearna kombinacija eksponencijalnih funkcija oblika $e^{r\lambda}$, gdje su λ korijeni karakteristične jednadžbe u skladu s (3.7). Dakle, opće rješenje je

$$y(x) = C_1 e^{0x} + C_2 e^x + C_3 e^{2x} + C_4 e^{3x}, \quad (3.14)$$

odnosno

$$y(x) = C_1 + C_2 e^x + C_3 e^{2x} + C_4 e^{3x}, \quad (3.15)$$

gdje su C_1, C_2, C_3, C_4 konstante.

Primjer 3.2. Riješimo jednadžbu

$$y^V - 4y^{IV} + 8y''' - 4y'' = 0. \quad (3.16)$$

Karakteristična jednadžba ove diferencijalne jednadžbe je oblika

$$\lambda^5 - 4\lambda^4 + 8\lambda^3 - 4\lambda^2 = 0, \quad (3.17)$$

odnosno

$$\lambda^2(\lambda - 2)^3 = 0. \quad (3.18)$$

Budući da je $\lambda_1 = 0$ korijen višestrukosti 2, a $\lambda_2 = 2$ korijen višestrukosti 3, opće rješenje jednadžbe je

$$y(x) = (C_1 + C_2x)e^{0x} + (C_3 + C_4x + C_5x^2)e^{2x}, \quad (3.19)$$

odnosno

$$y(x) = C_1 + C_2x + (C_3 + C_4x + C_5x^2)e^{2x}. \quad (3.20)$$

Primjer 3.3. Riješimo jednadžbu

$$y^V - 3y^{IV} + 3y''' - 5y'' + 6y' - 4y = 0. \quad (3.21)$$

Karakteristična jednadžba ove diferencijalne jednadžbe je oblika

$$\lambda^5 - 3\lambda^4 + 3\lambda^3 - 5\lambda^2 + 6\lambda - 4 = 0, \quad (3.22)$$

odnosno

$$(\lambda - 1)(\lambda + 2)(\lambda - (1 + i))(\lambda - (1 - i)) = 0. \quad (3.23)$$

Ova jednadžba ima dva različita realna korijena $\lambda_1 = 1$ i $\lambda_2 = -2$, te jedan konjugirano kompleksni par korijena $\lambda_3 = 1 + i$ i $\lambda_4 = 1 - i$.

Opće rješenje diferencijalne jednadžbe bit će linearna kombinacija eksponencijalnih i sinusno-kosinusnih funkcija. Za realne korijene $\lambda_1 = 1$ i $\lambda_2 = -2$, rješenje je u obliku eksponencijalnih funkcija, dok za konjugirano kompleksne korijene $\lambda_3 = 1 + i$ i $\lambda_4 = 1 - i$, rješenje sadrži eksponencijalne i trigonometrijske funkcije. Dakle, opće rješenje je:

$$y(x) = C_1e^x + C_2e^{-2x} + e^x(C_3 \cos(x) + C_4 \sin(x)). \quad (3.24)$$

3.2. Nehomogene jednadžbe

Nehomogena jednadžba ima oblik

$$a_n y^{(n)}(x) + a_{n-1} y^{(n-1)}(x) + \dots + a_1 y'(x) + a_0 y(x) = g(x), \quad (3.25)$$

gdje su a_0, a_1, \dots, a_n konstante, a $g(x)$ poznata funkcija.

Opće rješenje nehomogene jednačbe sastoji se od rješenja homogenog dijela jednačbe $y_h(x)$ i partikularnog rješenja čitave jednačbe $y_p(x)$, odnosno vrijedi

$$y(x) = y_h(x) + y_p(x). \quad (3.26)$$

Homogenim dijelom jednačbe smatramo homogenu jednačbu

$$a_n y^{(n)}(x) + a_{n-1} y^{(n-1)}(x) + \dots + a_1 y'(x) + a_0 y(x) = 0, \quad (3.27)$$

što znači da funkciju $y_h(x)$ određujemo na način opisan u prethodnom dijelu. Funkciju $y_p(x)$ određivat ćemo metodom neodređenih koeficijenata.

3.2.1. Metoda neodređenih koeficijenata

Metoda neodređenih koeficijenata koristi se kada je $g(x)$ jednostavna funkcija poput polinoma, eksponencijalne funkcije, sinusnih ili kosinusnih funkcija. Pretpostavlja se oblik partikularnog rješenja $y_p(x)$ s neodređenim koeficijentima koji se zatim određuju uvrštavanjem u polaznu jednačbu.

Primjerice, ako je

$$g(x) = e^{\alpha x} \quad (3.28)$$

pretpostavimo

$$y_p(x) = Ae^{\alpha x}. \quad (3.29)$$

Ako je nehomogeni dio već prisutan u općem rješenju homogenog dijela, da bismo izbjegli ponavljanje u rješenju, moramo pomnožiti pretpostavljeni oblik partikularnog rješenja s x^m gdje je m višestrukost pripadnog korijena karakteristične jednačbe.

Pokažimo sada na nekoliko primjera kako funkcionira metoda neodređenih koeficijenata.

Primjer 3.4. Riješimo sljedeću nehomogenu diferencijalnu jednačbu:

$$y'' - 3y' + 2y = e^{3x}. \quad (3.30)$$

Prvo rješavamo homogeni dio jednačbe:

$$y_h'' - 3y_h' + 2y_h = 0, \quad (3.31)$$

čija je karakteristična jednačba:

$$\lambda^2 - 3\lambda + 2 = 0. \quad (3.32)$$

Dobijamo dva realna korijena:

$$\lambda_1 = 2, \quad \lambda_2 = 1, \quad (3.33)$$

pa je opće rješenje homogenog dijela:

$$y_h(x) = C_1 e^{2x} + C_2 e^x. \quad (3.34)$$

Budući da je desna strana jednadžbe e^{3x} , pretpostavljamo da će partikularno rješenje biti oblika:

$$y_p(x) = Ae^{3x}, \quad (3.35)$$

gdje je A nepoznati koeficijent koji trebamo odrediti.

Izračunajmo prve dvije derivacije pretpostavljenog partikularnog rješenja. Slijedi:

$$y'_p(x) = 3Ae^{3x}, \quad (3.36)$$

$$y''_p(x) = 9Ae^{3x}. \quad (3.37)$$

Sada uvrstimo $y_p(x)$, $y'_p(x)$ i $y''_p(x)$ u polaznu jednadžbu. Dobivamo

$$9Ae^{3x} - 3(3Ae^{3x}) + 2(Ae^{3x}) = e^{3x}, \quad (3.38)$$

$$9Ae^{3x} - 9Ae^{3x} + 2Ae^{3x} = e^{3x}, \quad (3.39)$$

$$2Ae^{3x} = e^{3x}. \quad (3.40)$$

Podijelimo obje strane s e^{3x} i dobivamo

$$2A = 1, \quad (3.41)$$

$$A = \frac{1}{2}. \quad (3.42)$$

Prema tome, traženo partikularno rješenje je:

$$y_p(x) = \frac{1}{2}e^{3x}. \quad (3.43)$$

Konačno rješenje nehomogene jednadžbe je zbroj rješenja homogenog dijela i partikularnog rješenja:

$$y(x) = C_1 e^{2x} + C_2 e^x + \frac{1}{2}e^{3x}. \quad (3.44)$$

Primjer 3.5. Riješimo nehomogenu diferencijalnu jednadžbu:

$$y''' - 2y'' = 3. \quad (3.45)$$

Homogeni dio jednadžbe je:

$$y'''_h - 2y''_h = 0, \quad (3.46)$$

a njegova karakteristična jednadžba poprima oblik

$$\lambda^3 - 2\lambda^2 = 0. \quad (3.47)$$

Rješavanjem ove jednadžbe dobivamo dva korijena:

$$\lambda_1 = 0, \quad \lambda_2 = 2, \quad (3.48)$$

pri čemu je λ_1 dvostruki korijen, pa je opće rješenje homogenog dijela

$$y_h(x) = C_1 + C_2x + C_3e^{2x}. \quad (3.49)$$

Budući da je desna strana jednadžbe konstanta 3, pretpostavili bismo da je partikularno rješenje oblika:

$$y_p(x) = A. \quad (3.50)$$

Međutim, takav se oblik već pojavljuje u općem rješenju i dolazi od korijena $\lambda = 0$. Stoga moramo partikularno rješenje pomnožiti s x^2 . Kvadrat stavljamo jer je to korijen višestrukosti 2. Dakle, partikularno rješenje postaje:

$$y_p(x) = Ax^2. \quad (3.51)$$

Izračunajmo sada derivacije partikularnog rješenja $y_p(x) = Ax^2$. Dobivamo:

$$y_p'(x) = 2Ax, \quad (3.52)$$

$$y_p''(x) = 2A, \quad (3.53)$$

$$y_p'''(x) = 0. \quad (3.54)$$

Sada uvrstimo $y_p(x)$, $y_p'(x)$, $y_p''(x)$ i $y_p'''(x)$ u polaznu jednadžbu:

$$y_p''' - 2y_p'' = 3. \quad (3.55)$$

Dobivamo

$$0 - 2(2A) = 3, \quad (3.56)$$

$$A = -\frac{3}{4}. \quad (3.57)$$

Partikularno rješenje je sada oblika:

$$y_p(x) = -\frac{3}{4}x^2. \quad (3.58)$$

Konačno rješenje nehomogene jednadžbe je:

$$y(x) = C_1 + C_2x + C_3e^{2x} - \frac{3}{4}x^2. \quad (3.59)$$

3.2.2. Metoda varijacije konstanti

Metoda varijacije parametara je općenitija i primjenjiva na širi spektar funkcija $g(x)$ i uglavnom je koristimo ako funkcija $g(x)$ nema neki jednostavni oblik, tj. nije polinom, eksponencijalna, sinusna ili kosinusa funkcija.

Kod ove metode pretpostavlja se da opće rješenje zadane jednačbe ima oblik:

$$y(x) = u_1(x)y_1(x) + u_2(x)y_2(x) + \dots + u_n(x)y_n(x), \quad (3.60)$$

gdje su $y_1(x), y_2(x), \dots, y_n(x)$ rješenja homogene jednačbe

$$a_n y^{(n)}(x) + a_{n-1} y^{(n-1)}(x) + \dots + a_1 y'(x) + a_0 y(x) = 0, \quad (3.61)$$

a $u_1(x), u_2(x), \dots, u_n(x)$ funkcije koje se određuju rješavanjem sustava:

$$u'_1(x)y_1(x) + u'_2(x)y_2(x) + \dots + u'_n(x)y_n(x) = 0, \quad (3.62)$$

$$u'_1(x)y'_1(x) + u'_2(x)y'_2(x) + \dots + u'_n(x)y'_n(x) = 0, \quad (3.63)$$

$$\vdots \quad (3.64)$$

$$u'_1(x)y_1^{(n-2)}(x) + u'_2(x)y_2^{(n-2)}(x) + \dots + u'_n(x)y_n^{(n-2)}(x) = 0, \quad (3.65)$$

$$u'_1(x)y_1^{(n-1)}(x) + u'_2(x)y_2^{(n-1)}(x) + \dots + u'_n(x)y_n^{(n-1)}(x) = g(x). \quad (3.66)$$

Primijetimo da su ove funkcije kod općeg rješenja homogene jednačbe konstante, zbog čega se ova metoda i naziva metoda varijacije konstanti.

Pokažimo kako ova metoda funkcionira na jednom primjeru.

Primjer 3.6. Riješimo diferencijalnu jednačbu:

$$y'' + y = \frac{1}{\cos(x)}. \quad (3.67)$$

Homogeni dio jednačbe je:

$$y''_h + y_h = 0, \quad (3.68)$$

s karakterističnom jednačbom:

$$\lambda^2 + 1 = 0. \quad (3.69)$$

Rješenja karakteristične jednačbe su:

$$\lambda_1 = i, \quad \lambda_2 = -i, \quad (3.70)$$

pa je opće rješenje homogenog dijela:

$$y_h(x) = C_1 \cos(x) + C_2 \sin(x). \quad (3.71)$$

Sada pretpostavljamo da opće rješenje polazne jednadžbe ima oblik:

$$y(x) = u_1(x) \cos(x) + u_2(x) \sin(x), \quad (3.72)$$

pri čemu funkcije $u_1(x)$ i $u_2(x)$ određujemo iz sustava

$$u_1'(x) \cos(x) + u_2'(x) \sin(x) = 0, \quad (3.73)$$

$$-u_1'(x) \sin(x) + u_2'(x) \cos(x) = \frac{1}{\cos(x)}. \quad (3.74)$$

Iz prve jednadžbe je:

$$u_1'(x) = -u_2'(x) \frac{\sin(x)}{\cos(x)} = -u_2'(x) \tan(x), \quad (3.75)$$

što uvrštavanjem u drugu jednadžbu daje:

$$-u_2'(x) \tan(x) \sin(x) + u_2'(x) \cos(x) = \frac{1}{\cos(x)}. \quad (3.76)$$

Pojednostavlivanjem dobivamo:

$$u_2'(x) = \frac{1}{\cos^2(x)}, \quad (3.77)$$

a integriranjem slijedi:

$$u_2(x) = \tan(x) + C_2. \quad (3.78)$$

Sada iz prve jednadžbe za $u_1'(x)$ dobivamo

$$u_1'(x) = -\tan(x), \quad (3.79)$$

odnosno

$$u_1(x) = \ln |\cos(x)| + C_1. \quad (3.80)$$

Sada za konačno rješenje vrijedi

$$y(x) = (\ln |\cos(x)| + C_1) \cos(x) + (\tan(x) + C_2) \sin(x), \quad (3.81)$$

odnosno

$$y(x) = C_1 \cos(x) + C_2 \sin(x) + \ln |\cos(x)| \cos(x) + \tan(x) \sin(x). \quad (3.82)$$

4. Sustavi običnih diferencijalnih jednačbi

Sustav običnih diferencijalnih jednačbi je skup diferencijalnih jednačbi u kojima se javlja jedna nezavisna varijabla t i određen broj nepoznatih funkcija

$$x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), \quad (4.1)$$

koje u jednačbama mogu biti uključene i putem derivacija.

Primjer 4.1. *Sustav običnih diferencijalnih jednačbi oblika*

$$\begin{aligned} x_1'''' + 2x_2''' - x_3'' + 3x_4 - 4x_5 &= 0, \\ -x_2'''' + x_1''' + 5x_3'' - 3x_4 + x_5' &= 0, \\ 3x_3'''' - 4x_1'' + 2x_2''' + 6x_3 + x_5'' &= 0, \\ x_4'''' - 2x_1''' + x_2'' + 4x_3' - 5x_5 &= 0, \\ -x_5'''' + 3x_1'' - 2x_2''' + x_3' - 6x_4 &= 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

je primjer sustava običnih diferencijalnih jednačbi s pet nepoznatih funkcija x_1, x_2, \dots, x_5 nezavisne varijable t .

4.1. Kanonska forma sustava običnih diferencijalnih jednačbi

U teoriji diferencijalnih jednačbi pokazuje se da je svaki sustav jednačbi bilo kojeg reda moguće svesti na sustav jednačbi prvog reda te je tog razloga dovoljno promatrati samo sustave jednačbi prvog reda. Takav sustav u svojoj najopćenitijoj formi izgleda ovako:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= f_1(t, x_1, x_2, \dots, x_n), \\ \frac{dx_2}{dt} &= f_2(t, x_1, x_2, \dots, x_n), \\ &\dots \\ \frac{dx_n}{dt} &= f_n(t, x_1, x_2, \dots, x_n), \end{aligned} \quad (4.3)$$

gdje su f_n neke unaprijed zadane funkcije. Ovakva se forma obično naziva normalna ili kanonska forma sustava običnih diferencijalnih jednačbi.

Pokažimo sada taj postupak na primjeru.

Primjer 4.2. *Razmotrimo sustav diferencijalnih jednačbi drugog reda s dvije funkcije $y_1(t)$ i $y_2(t)$:*

$$\begin{aligned}\frac{d^2y_1(t)}{dt^2} + 3\frac{dy_1(t)}{dt} + 2y_1(t) &= \sin(t), \\ \frac{d^2y_2(t)}{dt^2} + 4\frac{dy_2(t)}{dt} + y_2(t) &= \cos(t).\end{aligned}\tag{4.4}$$

Da bismo ovaj sustav diferencijalnih jednadžbi drugog reda sveli na sustav jednadžbi prvog reda, definirajmo nove varijable:

$$\begin{aligned}x_1(t) &= y_1(t), & x_2(t) &= \frac{dy_1(t)}{dt}, \\ x_3(t) &= y_2(t), & x_4(t) &= \frac{dy_2(t)}{dt}.\end{aligned}\tag{4.5}$$

Sada možemo zapisati jednadžbe za $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ i $x_4(t)$ kao:

$$\begin{aligned}\frac{dx_1(t)}{dt} &= x_2(t), \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= \sin(t) - 3x_2(t) - 2x_1(t), \\ \frac{dx_3(t)}{dt} &= x_4(t), \\ \frac{dx_4(t)}{dt} &= \cos(t) - 4x_4(t) - x_3(t).\end{aligned}\tag{4.6}$$

Na taj način smo originalni sustav diferencijalnih jednadžbi drugog reda sveli na sustav diferencijalnih jednadžbi prvog reda za funkcije $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ i $x_4(t)$.

Opće rješenje sustava običnih diferencijalnih jednadžbi, analogno kao i kod jedne jednadžbe uključuje sve moguće rješenja sustava i obično sadrži n nepoznatih konstanti (jednu za svaku nepoznatu funkciju). Ovo rješenje predstavlja cijelu familiju funkcija koje zadovoljavaju diferencijalne jednadžbe uključene u sustav.

4.2. Linearni i nelinearni sustavi običnih diferencijalnih jednadžbi

Linearni sustavi običnih diferencijalnih jednadžbi su sustavi u kojima su sve diferencijalne jednadžbe linearne u odnosu na nepoznate funkcije i njihove derivacije. Opći oblik linearnog sustava običnih diferencijalnih jednadžbi za n nepoznatih funkcija $x_1(t)$, $x_2(t)$, \dots , $x_n(t)$ može se zapisati kao:

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = a_{11}(t)x_1(t) + a_{12}(t)x_2(t) + \dots + a_{1n}(t)x_n(t) + b_1(t),\tag{4.7}$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = a_{21}(t)x_1(t) + a_{22}(t)x_2(t) + \dots + a_{2n}(t)x_n(t) + b_2(t),\tag{4.8}$$

⋮

$$\frac{dx_n(t)}{dt} = a_{n1}(t)x_1(t) + a_{n2}(t)x_2(t) + \cdots + a_{nn}(t)x_n(t) + b_n(t), \quad (4.9)$$

gdje su $a_{ij}(t)$ koeficijenti koji mogu biti funkcije vremena t (ili konstante), a $b_i(t)$ su poznate funkcije vremena t koje predstavljaju slobodne članove.

Nelinearni sustavi običnih diferencijalnih jednadžbi su sustavi u kojima barem jedna diferencijalna jednadžba nije linearna u odnosu na nepoznate funkcije ili njihove derivacije.

U inženjerstvu često se nalazi na sustave koji se modeliraju skupom linearnih diferencijalnih jednadžbi, posebice onih s konstantnim koeficijentima.

Primjer 4.3. Razmotrimo sljedeći linearni sustav običnih diferencijalnih jednadžbi:

$$\frac{dx_1}{dt} = 3x_1 + 2x_2, \quad (4.10)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -x_1 + 4x_2. \quad (4.11)$$

Ovaj sustav je linearan jer su obje jednadžbe linearne kombinacije x_1 i x_2 .

Primjer 4.4. Razmotrimo sada sljedeći nelinearni sustav običnih diferencijalnih jednadžbi:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_1^2 + x_2 \quad (4.12)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \sin(x_1) + x_1x_2 \quad (4.13)$$

Ovaj sustav je nelinearan jer se u prvoj jednadžbi pojavljuje x_1^2 , a u drugoj $\sin(x_1)$ i produkt x_1x_2 .

Linearni sustav običnih diferencijalnih jednadžbi je homogen ako su svi slobodni članovi u jednadžbama jednaki nuli. To znači da se jednadžbe sustava mogu zapisati bez članova koji ne sadrže nepoznate funkcije.

Opći oblik homogenog linearnog sustava za n nepoznatih funkcija $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ može se zapisati kao:

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = a_{11}(t)x_1(t) + a_{12}(t)x_2(t) + \cdots + a_{1n}(t)x_n(t), \quad (4.14)$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = a_{21}(t)x_1(t) + a_{22}(t)x_2(t) + \cdots + a_{2n}(t)x_n(t), \quad (4.15)$$

⋮

$$\frac{dx_n(t)}{dt} = a_{n1}(t)x_1(t) + a_{n2}(t)x_2(t) + \cdots + a_{nn}(t)x_n(t). \quad (4.16)$$

Drugim riječima, homogeni sustav ne sadrži slobodne članove $b_i(t)$ (koji bi ovisili samo o varijabli t ili bili konstante), tj. $b_1(t) = b_2(t) = \cdots = b_n(t) = 0$.

Primjer 4.5. Razmotrimo sljedeći sustav:

$$\frac{dx_1}{dt} = 2x_1 + 3x_2, \quad (4.17)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -x_1 + 4x_2. \quad (4.18)$$

Ovaj sustav je homogen jer ne sadrži slobodne članove.

Primjer 4.6. Razmotrimo sljedeći sustav:

$$\frac{dx_1}{dt} = 2x_1 + 3x_2 + 5 \quad (4.19)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -x_1 + 4x_2 + 7 \quad (4.20)$$

Ovdje 5 i 7 predstavljaju slobodne članove, što čini sustav nehomogenim.

4.3. Autonomni i neautonomni sustavi običnih diferencijalnih jednadžbi

Autonomni sustav običnih diferencijalnih jednadžbi je sustav u kojemu derivacije nepoznatih funkcija ovise samo o tim funkcijama, a ne o nezavisnoj varijabli (najčešće vremenu t). Drugim riječima, autonomni sustavi nemaju eksplicitnu ovisnost o varijabli t .

Opći oblik autonomnog sustava za n nepoznatih funkcija $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ može se zapisati kao:

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (4.21)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (4.22)$$

⋮

$$\frac{dx_n}{dt} = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (4.23)$$

Primjer 4.7. Razmotrimo sljedeći sustav:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_1^2 - x_2, \quad (4.24)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = x_1 + x_2. \quad (4.25)$$

Ovaj sustav je autonoman jer ni jedna od jednadžbi ne sadrži eksplicitnu ovisnost o varijabli t .

Neautonomni sustav običnih diferencijalnih jednadžbi je sustav u kojemu derivacije nepoznatih funkcija ovise i o nepoznatim funkcijama i o nezavisnoj varijabli (npr. vremenu t).

Opći oblik neautonomnog sustava za n nepoznatih funkcija $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ može se zapisati kao:

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(t, x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (4.26)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2(t, x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (4.27)$$

$$\vdots$$

$$\frac{dx_n}{dt} = f_n(t, x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (4.28)$$

Primjer 4.8. Razmotrimo sljedeći sustav:

$$\frac{dx_1}{dt} = tx_1 + \sin(t), \quad (4.29)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = x_2 + e^t. \quad (4.30)$$

Ovaj sustav je neautonoman jer obje jednadžbe sadrže eksplicitnu ovisnost o vremenu t .

5. Rješavanje sustava običnih diferencijalnih jednačbi metodom supstitucije

Neka nam je zadan sustav običnih diferencijalnih jednačbi u svojoj kanonskoj formi s:

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= f_1(t, x_1, x_2, \dots, x_n), \\ \frac{dx_2}{dt} &= f_2(t, x_1, x_2, \dots, x_n), \\ &\dots \\ \frac{dx_n}{dt} &= f_n(t, x_1, x_2, \dots, x_n),\end{aligned}\tag{5.1}$$

uz iste oznake kao u prethodnom poglavlju. Ovaj se sustav svodi na jednu diferencijalnu jednačbu n -tog reda tako da uočimo jednu nepoznatu funkciju, na primjer $x_1(t)$ pa nađemo njene derivacije:

$$\frac{d^2x_1}{dt^2}, \frac{d^3x_1}{dt^3}, \dots, \frac{d^nx_1}{dt^n}.\tag{5.2}$$

Iz prve jednačbe sustava, prema pravilu za derivaciju složene funkcije slijedi

$$\frac{d^2x_1}{dt^2} = \frac{\partial f_1}{\partial t} + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \frac{dx_1}{dt} + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \frac{dx_n}{dt},\tag{5.3}$$

te ako uvrstimo u ovu jednačbu u izraze za derivacije $\frac{dx_i}{dt}, i = 1, 2, \dots, n$ iz sustava dobit ćemo

$$\frac{d^2x_1}{dt^2} = g_2(t, x_1, x_2, \dots, x_n).\tag{5.4}$$

Analogno dobijemo

$$\frac{d^3x_1}{dt^3} = g_3(t, x_1, x_2, \dots, x_n),\tag{5.5}$$

a postupak možemo nastaviti do sustava:

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= f_1(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \frac{d^2x_1}{dt^2} &= g_2(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &\dots \\ \frac{d^nx_1}{dt^n} &= g_n(t, x_1, x_2, \dots, x_n).\end{aligned}\tag{5.6}$$

Iz sustava (5.6) teoretski je moguće eliminirati $n - 1$ nepoznatu funkciju x_2, \dots, x_n . Ipak treba napomenuti da je to izvedivo računski samo u najjednostavnijim slučajevima, kada kao rezultat te eliminacije dobijemo

$$F\left(t, x_1, \frac{dx_1}{dt}, \dots, \frac{d^nx_1}{dt^n}\right).\tag{5.7}$$

Ovo je diferencijalna jednačba n - tog reda za nepoznatu funkciju x_1 ali smo umjesto x_1 mogli uzeti bilo koju drugu nepoznatu funkciju.

Opće rješenje jednačbe (5.7) je sada oblika

$$x_1 = \varphi_1(t, C_1, C_2, \dots, C_n). \quad (5.8)$$

Ako iz ovog izraza izračunamo derivacije funkcije $x_1(t)$ i uvrstimo ih u (5.6), dobijemo nepoznate funkcije x_2, \dots, x_n sustava običnih jednačbi, a ne diferencijalnih, iz kojega u jednostavnijem slučaju možemo izračunati

$$\begin{aligned} x_2 &= \varphi_2(t, C_1, C_2, \dots, C_n) \\ &\dots \\ x_n &= \varphi_n(t, C_1, C_2, \dots, C_n). \end{aligned} \quad (5.9)$$

Funkcije (5.8) i (5.9) tvore opće rješenje zadanog sustava.

Pokažimo sada na nekoliko primjera kako ova metoda funkcionira. Najprije razmatramo jedan homogeni sustav.

Primjer 5.1. *Riješimo sustav običnih diferencijalnih jednačbi zadan s*

$$\begin{aligned} x' &= 3x + 4y, \\ y' &= -2x + y. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Deriviranjem prve jednačbe slijedi

$$x'' = 3x' + 4y', \quad (5.11)$$

u što uvrštavamo drugu jednačbu. Dobivamo

$$x'' = 3x' + 4(y - 2x), \quad (5.12)$$

odnosno

$$x'' = 3x' + 4y - 8x \quad (5.13)$$

Sada iz prve jednačbe izrazimo y :

$$y = \frac{1}{4}(x' - 3x), \quad (5.14)$$

što uvrstimo u jednačbu za x'' . Slijedi

$$x'' = 3x' + x' - 3x - 8x, \quad (5.15)$$

odnosno

$$x'' = 4x' - 11x. \quad (5.16)$$

Dobili smo homogenu linearnu jednadžbu s konstantnim koeficijentima koju rješavamo kroz karakterističnu jednadžbu:

$$r^2 - 4r + 11 = 0, \quad (5.17)$$

čija su rješenja

$$r = 2 \pm i\sqrt{7}. \quad (5.18)$$

Sada dobivamo opće rješenje za $x(t)$:

$$x(t) = e^{2t} \left(C_1 \cos(\sqrt{7}t) + C_2 \sin(\sqrt{7}t) \right) \quad (5.19)$$

Kada znamo $x(t)$, možemo pronaći $y(t)$ iz prve jednadžbe. Najprije izračunamo $x'(t)$:

$$x'(t) = 2e^{2t} \left(C_1 \cos(\sqrt{7}t) + C_2 \sin(\sqrt{7}t) \right) + e^{2t} \left(-C_1 \sqrt{7} \sin(\sqrt{7}t) + C_2 \sqrt{7} \cos(\sqrt{7}t) \right), \quad (5.20)$$

što uvrštavamo u izraz za $y(t)$. Slijedi:

$$y(t) = \frac{1}{4} \left[2e^{2t} \left(C_1 \cos(\sqrt{7}t) + C_2 \sin(\sqrt{7}t) \right) + e^{2t} \left(-C_1 \sqrt{7} \sin(\sqrt{7}t) + C_2 \sqrt{7} \cos(\sqrt{7}t) \right) - 3e^{2t} \left(C_1 \cos(\sqrt{7}t) + C_2 \sin(\sqrt{7}t) \right) \right] \quad (5.21)$$

Konačno, rješenje sustava je:

$$\begin{aligned} x(t) &= e^{2t} \left(C_1 \cos(\sqrt{7}t) + C_2 \sin(\sqrt{7}t) \right), \\ y(t) &= \frac{1}{4} \left[e^{2t} \left(-C_1 \cos(\sqrt{7}t) + C_2 \sqrt{7} \cos(\sqrt{7}t) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. (2 - \sqrt{7})C_1 \sin(\sqrt{7}t) - 3C_2 \sin(\sqrt{7}t) \right) \right], \end{aligned} \quad (5.22)$$

gdje su C_1 i C_2 konstante.

Pokažimo sada kako se rješava početni problem, odnosno problem u kojem su nam uz sustav poznati i početni uvjeti.

Primjer 5.2. Riješimo sustav običnih diferencijalnih jednadžbi

$$\begin{aligned} x' &= 2x + 3y, \\ y' &= -x + 4y, \end{aligned} \quad (5.23)$$

uz početne uvjete:

$$x(0) = 1, \quad y(0) = 0. \quad (5.24)$$

Prvu jednadžbu deriviramo s obzirom na t . Slijedi:

$$x'' = 2x' + 3y'. \quad (5.25)$$

Sada uvrštavamo izraz za y' iz sustava u jednadžbu za x'' :

$$x'' = 2x' + 3(4y - x), \quad (5.26)$$

što možemo preurediti kao:

$$x'' = 2x' + 12y - 3x. \quad (5.27)$$

Iz prve jednadžbe izrazimo y :

$$y = \frac{1}{3}(x' - 2x), \quad (5.28)$$

te ga uvrstimo u jednadžbu za x'' . Slijedi

$$x'' = 2x' + 12 \left(\frac{1}{3}(x' - 2x) \right) - 3x, \quad (5.29)$$

odnosno

$$x'' = 2x' + 4(x' - 2x) - 3x, \quad (5.30)$$

$$x'' - 6x' + 11x = 0. \quad (5.31)$$

Karakteristična jednadžba ove jednadžbe glasi:

$$r^2 - 6r + 11 = 0, \quad (5.32)$$

a njena su rješenja

$$r = 3 \pm i\sqrt{2}. \quad (5.33)$$

Opće rješenje za $x(t)$ je sada oblika:

$$x(t) = e^{3t} \left(C_1 \cos(\sqrt{2}t) + C_2 \sin(\sqrt{2}t) \right). \quad (5.34)$$

Sada izračunamo derivaciju funkcije $x(t)$:

$$x'(t) = 3e^{3t} \left(C_1 \cos(\sqrt{2}t) + C_2 \sin(\sqrt{2}t) \right) + e^{3t} \left(-C_1\sqrt{2} \sin(\sqrt{2}t) + C_2\sqrt{2} \cos(\sqrt{2}t) \right). \quad (5.35)$$

Izraz za $y(t)$ dobijemo iz prve jednadžbe uvrštavanjem $x'(t)$ i $x(t)$:

$$y(t) = \frac{1}{3} \left[3e^{3t} \left(C_1 \cos(\sqrt{2}t) + C_2 \sin(\sqrt{2}t) \right) + e^{3t} \left(-C_1\sqrt{2} \sin(\sqrt{2}t) + C_2\sqrt{2} \cos(\sqrt{2}t) \right) - 2e^{3t} \left(C_1 \cos(\sqrt{2}t) + C_2 \sin(\sqrt{2}t) \right) \right]. \quad (5.36)$$

Sada uvrstimo početne uvjete $x(0) = 1$ i $y(0) = 0$. Slijedi

$$x(0) = e^0 (C_1 \cos(0) + C_2 \sin(0)) = C_1 = 1 \quad (5.37)$$

te

$$y(0) = \frac{1}{3} \left[3C_1 + C_2\sqrt{2} - 2C_1 \right] = \frac{1}{3} \left(C_1 + C_2\sqrt{2} \right), \quad (5.38)$$

$$0 = \frac{1}{3}(1 + C_2\sqrt{2}). \quad (5.39)$$

Konačno rješenje je:

$$\begin{aligned} x(t) &= e^{3t} \left(\cos(\sqrt{2}t) - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin(\sqrt{2}t) \right), \\ y(t) &= e^{3t} \left(\frac{1}{3} \cos(\sqrt{2}t) - \frac{2}{3\sqrt{2}} \sin(\sqrt{2}t) \right). \end{aligned} \quad (5.40)$$

U sljedećem je primjeru dan sustav s većim brojem nepoznanica.

Primjer 5.3. Riješimo sustav običnih diferencijalnih jednačbi zadan s:

$$\begin{aligned}x'_1 &= 2x_1 + x_2, \\x'_2 &= x_1 + 3x_2 + x_3, \\x'_3 &= x_2 + 2x_3 + x_4, \\x'_4 &= x_3 + 4x_4.\end{aligned}\tag{5.41}$$

Iz prve jednačbe možemo izraziti x_2 :

$$x_2 = x'_1 - 2x_1.\tag{5.42}$$

Zatim zamjenjujemo ovaj izraz za x_2 u drugu jednačbu:

$$x'_2 = (x'_1 - 2x_1)' + 3(x'_1 - 2x_1) + x_3.\tag{5.43}$$

Deriviramo izraz:

$$x'_2 = x''_1 - 2x'_1 + 3x'_1 - 6x_1 + x_3 = x''_1 + x'_1 - 6x_1 + x_3.\tag{5.44}$$

Sada možemo izraziti x_3 :

$$x_3 = x'_2 - x''_1 - x'_1 + 6x_1.\tag{5.45}$$

Zatim zamjenjujemo ovaj izraz za x_3 u treću jednačbu:

$$x'_3 = (x'_2 - x''_1 - x'_1 + 6x_1)' + 2(x'_2 - x''_1 - x'_1 + 6x_1) + x_4.\tag{5.46}$$

Deriviramo izraz:

$$x'_3 = x''_2 - x'''_1 - x''_1 + 6x'_1 + 2x'_2 - 2x''_1 - 2x'_1 + 12x_1 + x_4.\tag{5.47}$$

Slijedi:

$$x'_3 = x''_2 + 2x'_2 - x'''_1 - 3x''_1 + 4x'_1 + 12x_1 + x_4.\tag{5.48}$$

Sada možemo izraziti x_4 :

$$x_4 = x'_3 - x''_2 - 2x'_2 + x'''_1 + 3x''_1 - 4x'_1 - 12x_1.\tag{5.49}$$

Zadnja jednačba, koja uključuje x_4 , postaje:

$$x'_4 = (x'_3 - x''_2 - 2x'_2 + x'''_1 + 3x''_1 - 4x'_1 - 12x_1)' + 4(x'_3 - x''_2 - 2x'_2 + x'''_1 + 3x''_1 - 4x'_1 - 12x_1).\tag{5.50}$$

Deriviramo i sređujemo sve članove:

$$x'_4 = x_1^{(4)} + 5x_1''' + 10x_1'' + 10x_1' + 5x_1.\tag{5.51}$$

Ovo je homogena linearna diferencijalna jednačba četvrtog reda za $x_1(t)$. Karakteristična jednačba za ovu diferencijalnu jednačbu je:

$$r^4 + 5r^3 + 10r^2 + 10r + 5 = 0 \quad (5.52)$$

Korijeni karakteristične jednačbe su:

$$r_1 = -1, \quad r_2 = -1, \quad r_3 = -1 + \sqrt{2}i, \quad r_4 = -1 - \sqrt{2}i. \quad (5.53)$$

S obzirom na to da imamo dvojni realni korijen $r_1 = r_2 = -1$ i dva kompleksna korijena $r_3 = -1 + \sqrt{2}i$ i $r_4 = -1 - \sqrt{2}i$, opće rješenje za $x_1(t)$ je:

$$x_1(t) = e^{-t} \left(C_1 + C_2 t + C_3 \cos(\sqrt{2}t) + C_4 \sin(\sqrt{2}t) \right) \quad (5.54)$$

Koristimo izraze za $x_2(t)$, $x_3(t)$ i $x_4(t)$ koje smo dobili ranije. Izračunamo derivaciju $x_1'(t)$:

$$\begin{aligned} x_1'(t) = & -e^{-t} \left(C_1 + C_2 t + C_3 \cos(\sqrt{2}t) + C_4 \sin(\sqrt{2}t) \right) + \\ & e^{-t} \left(C_2 + C_3 \sqrt{2} \sin(\sqrt{2}t) - C_4 \sqrt{2} \cos(\sqrt{2}t) \right) \end{aligned} \quad (5.55)$$

Tada je:

$$\begin{aligned} x_2(t) = & -e^{-t} \left(C_1 + C_2 t + C_3 \cos(\sqrt{2}t) + C_4 \sin(\sqrt{2}t) \right) + \\ & e^{-t} \left(C_2 + C_3 \sqrt{2} \sin(\sqrt{2}t) - C_4 \sqrt{2} \cos(\sqrt{2}t) \right) \\ & - 2e^{-t} \left(C_1 + C_2 t + C_3 \cos(\sqrt{2}t) + C_4 \sin(\sqrt{2}t) \right) \end{aligned} \quad (5.56)$$

Za $x_3(t)$ i $x_4(t)$ izrazi su slični, a dobivamo ih koristeći ranije dobivene odnose.

Konačno rješenje za sustav je:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= e^{-t} \left(C_1 + C_2 t + C_3 \cos(\sqrt{2}t) + C_4 \sin(\sqrt{2}t) \right), \\ x_2(t) &= e^{-t} \left(-3C_1 - 3C_2 t + (C_2 - 2C_3 \cos(\sqrt{2}t)) - (2C_4 + C_4 \sqrt{2}) \sin(\sqrt{2}t) \right), \\ x_3(t) &= e^{-t} \left(6C_1 + 6C_2 t + 3C_3 \cos(\sqrt{2}t) + 3C_4 \sin(\sqrt{2}t) \right), \\ x_4(t) &= e^{-t} \left(4C_1 + 4C_2 t - C_2 \sqrt{2} \sin(\sqrt{2}t) + C_4 \sqrt{2} \cos(\sqrt{2}t) \right). \end{aligned} \quad (5.57)$$

gdje su C_1 , C_2 , C_3 , i C_4 konstante.

Riješimo sada još jedan primjer nehomogenog sustava.

Primjer 5.4. Odredimo opće rješenje sustava običnih diferencijalnih jednačbi zadanog s:

$$\begin{aligned} x_1' &= 4x_1 + 9x_2 + 5t + 12, \\ x_2' &= x_1 + 4x_2 + 3t. \end{aligned} \quad (5.58)$$

Iz druge jednadžbe slijedi:

$$x_1 = x_2' - 4x_2 - 3t, \quad (5.59)$$

što uvrštavamo u prvu jednadžbu. Dobivamo

$$x_1' = 4(x_2' - 4x_2 - 3t) + 9x_2 + 5t + 12, \quad (5.60)$$

$$x_1' = 4x_2' - 7x_2 - 7t + 12. \quad (5.61)$$

Deriviranjem prve jednadžbe slijedi

$$x_1' = x_2'' - 4x_2' - 3, \quad (5.62)$$

što uvrštavanjem u dobiveni izraz daje

$$x_2'' - 4x_2' - 3 = 4x_2' - 7x_2 - 7t + 12, \quad (5.63)$$

odnosno

$$x_2'' - 8x_2' + 7x_2 = -7t + 15. \quad (5.64)$$

Ova jednadžba je linearna diferencijalna jednadžba drugog reda s konstantnim koeficijentima i desnom stranom koja ovisi o vremenu.

Pripadna homogena jednadžba je:

$$x_2'' - 8x_2' + 7x_2 = 0, \quad (5.65)$$

a njena karakteristična jednadžba glasi:

$$r^2 - 8r + 7 = 0. \quad (5.66)$$

Rješenja karakteristične jednadžbe su

$$r_1 = 7, \quad r_2 = 1. \quad (5.67)$$

Opće rješenje homogene jednadžbe je:

$$x_{2h}(t) = C_1 e^{7t} + C_2 e^t \quad (5.68)$$

Partikularno rješenje pretpostavljamo u obliku:

$$x_{2p}(t) = At + B. \quad (5.69)$$

Uvrštavanjem u jednadžbu dobijamo:

$$0 - 8A + 7(At + B) = -7t + 15 \quad (5.70)$$

Odakle slijedi:

$$7A = -7 \Rightarrow A = -1, \quad (5.71)$$

te

$$-8A + 7B = 15 \Rightarrow 8 + 7B = 15 \Rightarrow B = 1. \quad (5.72)$$

Tada je partikularno rješenje:

$$x_{2p}(t) = -t + 1 \quad (5.73)$$

Konačno rješenje za x_2 je:

$$x_2(t) = C_1 e^{7t} + C_2 e^t - t + 1 \quad (5.74)$$

Deriviramo $x_2(t)$:

$$x_2'(t) = 7C_1 e^{7t} + C_2 e^t - 1 \quad (5.75)$$

I uvrstimo i izraz za $x_1(t)$:

$$x_1(t) = (7C_1 e^{7t} + C_2 e^t - 1) - 4(C_1 e^{7t} + C_2 e^t - t + 1) - 3t, \quad (5.76)$$

$$x_1(t) = 7C_1 e^{7t} + C_2 e^t - 1 - 4C_1 e^{7t} - 4C_2 e^t + 4t - 4 - 3t, \quad (5.77)$$

$$x_1(t) = 3C_1 e^{7t} - 3C_2 e^t + t - 5 \quad (5.78)$$

Konačno rješenje sustava glasi:

$$x_1(t) = 3C_1 e^{7t} - 3C_2 e^t + t - 5, \quad (5.79)$$

$$x_2(t) = C_1 e^{7t} + C_2 e^t - t + 1. \quad (5.80)$$

6. Rješavanje sustava običnih diferencijalnih jednadžbi matičnom metodom

Linearne sustave s konstantnim koeficijentima možemo riješavati i na drugi način korištenjem matičnog postupka. Sustav možemo napisati u obliku matične jednakosti

$$\dot{x} = Ax + B, \quad (6.1)$$

gdje je

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1(t) \\ b_2(t) \\ \vdots \\ b_n(t) \end{bmatrix}.$$

Opće rješenje moguće je napisati u obliku

$$x = x_h + x_p \quad (6.2)$$

gdje je x_h opće rješenje pridruženog homogenog sustava

$$\dot{x} = Ax, \quad (6.3)$$

a x_p jedno partikularno rješenje zadanog nehomogenog sustava.

Rješenje sustava (6.3) tražimo po analogiji s linearnom diferencijalnom jednadžbom prvog reda, u obliku

$$x = ye^{\lambda t} \quad (6.4)$$

gdje je y nepoznati vektor. Tada je

$$\dot{x} = \lambda ye^{\lambda t}, \quad (6.5)$$

što uvrštavanjem u (6.3) daje

$$(A - \lambda E)y = 0, \quad (6.6)$$

gdje je E jedinična matrica.

Ovakva se jednadžba naziva karakteristična jednadžba sustava te je ta jednadžba ekvivalentna sustavu

$$\begin{aligned} (a_{11} - \lambda)y_1 + a_{12}y_2 + \cdots + a_{1n}y_n &= 0, \\ a_{21}y_1 + (a_{22} - \lambda)y_2 + \cdots + a_{2n}y_n &= 0, \\ &\dots\dots\dots \\ a_{n1}y_1 + a_{n2}y_2 + \cdots + (a_{nn} - \lambda)y_n &= 0. \end{aligned} \quad (6.7)$$

Da bi ovaj sustav imao netrivialno rješenje mora biti

$$\text{Det}(A - \lambda E) = 0. \quad (6.8)$$

Ovo je jednačba n - tog reda sa nepoznanicom λ čija se rješenja zovu svojstvene vrijednosti matrice A , a rješenja su $\lambda_1, \dots, \lambda_n$.

Jednostavnosti radi promatramo samo slučaj kada su sve ove vrijednosti realne i međusobno različite. Svakoj vrijednosti od λ pripada vektor s koordinatama $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ koje su rješenje sustava te se taj vektor naziva svojstveni vektor matrice A .

Može se pokazati da je tako dobiveni skup vektora $\{y^1, y^2, \dots, y^n\}$ linearno nezavisan te dobivamo da je opće rješenje sustava (6.3)

$$y_h = C_1 y^1 e^{\lambda_1 t} + \dots + C_n y^n e^{\lambda_n t}, \quad (6.9)$$

gdje su C_1, \dots, C_n proizvoljne konstante.

Riješimo sada ponovo primjer

$$\dot{x}_1 = 4x_1 + 9x_2 + 5t + 12$$

$$\dot{x}_2 = x_1 + 4x_2 + 3t$$

Slijedi:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 4 & 9 \\ 1 & 4 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 5t + 12 \\ 3t \end{bmatrix},$$

pa jednačba (6.8) poprima oblik

$$\begin{vmatrix} 4 - \lambda & 9 \\ 1 & 4 - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (6.10)$$

odnosno

$$\lambda^2 - 8\lambda + 7 = 0. \quad (6.11)$$

Rješenja su e $\lambda_1 = 1$ i $\lambda_2 = 7$ za koje iz (6.7) naalzimo pripadne vektore.

Za $\lambda_1 = 1$ sustav postaje

$$3y_1 + 9y_2 = 0$$

$$y_1 + 3y_2 = 0,$$

pa je npr. $y_1 = 3, y_2 = -1$ jedno rješenje. Slično, nalazimo $y_1 = 3, y_2 = 1$ kao jedno od rješenja za $\lambda_2 = 7$. Pripadni vektori su

$$y_1 = \begin{bmatrix} 3 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad y_2 = \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6.12)$$

pa je rješenje homogenog sustava

$$x_h = C_1 \begin{bmatrix} 3 \\ -1 \end{bmatrix} e^t + C_2 \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \end{bmatrix} e^{7t}. \quad (6.13)$$

Ovime smo dobili rješenje homogenog dijela sustav. Konačno rješenje sustava dobivamo na način opisan u prethodnom poglavlju.

7. Laplaceova transformacija

Pierre-Simon Laplace, francuski matematičar i astronom, prvi je uveo ovu transformaciju krajem 18. stoljeća. Iako je Laplaceova transformacija u početku bila razvijena za rješavanje problema u astronomiji i mehanici, njezin puni potencijal postao je očigledan tek kasnije, kada su je inženjeri i znanstvenici počeli koristiti u analizi električnih i mehaničkih sustava.

Laplaceova transformacija je matematički alat koji je postao ključan u analizi i sintezi dinamičkih sustava, osobito u inženjerskim disciplinama kao što su elektrotehnika, strojarstvo i upravljanje sustavima. Ova transformacija omogućava pretvaranje diferencijalnih jednadžbi, koje opisuju dinamiku sustava, u algebarske jednadžbe koje su jednostavnije za rješavanje. Pri tome matematička operacija deriviranja prelazi u množenje s Laplaceovom varijablom s , a integriranje u dijeljenje s varijablom s .

Laplaceova transformacija funkcije $f(t)$ definira se integralom:

$$L[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt. \quad (7.1)$$

Jedan od ključnih elemenata Laplaceove transformacije su njezina linearna svojstva, što znači da transformacija linearne kombinacije funkcija odgovara linearnoj kombinaciji njihovih transformacija.

Iako je Laplaceova transformacija moćan alat, ona ima i svoja ograničenja. Jedno od glavnih ograničenja je da se može primijeniti samo na funkcije koje su definirane za $t \geq 0$ i koje su eksponencijalno ograničene. To znači da funkcije koje rastu brže od eksponencijalne funkcije nisu pogodne za ovu transformaciju. Pored toga, Laplaceova transformacija može biti kompleksna za funkcije koje imaju diskontinuitete ili singularitete. Uz to može se desiti i da pri praktičnoj primjeni, posebno u digitalnim računalima, mogu se javiti numerički problemi izračuna. Također nije primjenjiva za nelinearne sustave koji nisu prethodno linearizirani.

Navedimo sada osnovna svojstva Laplaceove transformacije nužna za rješavanje sustava običnih diferencijalnih jednadžbi.

Teorem 7.1 (Linearnost integralne transformacije). *Neka su zadane funkcije $f, g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ te neka je \mathcal{L} Laplaceova transformacija. Vrijedi:*

$$\mathcal{L}\{af(t) + bg(t)\} = a\mathcal{L}\{f(t)\} + b\mathcal{L}\{g(t)\}, \quad (7.2)$$

pri čemu su a i b proizvoljne konstante.

Teorem 7.2 (Teorem sličnosti). *Neka je f funkcija koja zadovoljava uvjete za postojanje Laplaceove transformacije. Tada za realnu konstantu $\omega > 0$ vrijedi*

$$\mathcal{L}\{f(\omega t)\} = \frac{1}{\omega} F\left(\frac{s}{\omega}\right). \quad (7.3)$$

Teorem 7.3 (Teorem o prigušenju (pomaku u slici)). *Neka je $\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s)$ i $a \in \mathbb{R}$. Tada je*

$$\mathcal{L}\{e^{at}f(t)\} = F(s - a). \quad (7.4)$$

Teorem 7.4 (Teorem o derivaciji slike). *Ako je $\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s)$, tada je*

$$\mathcal{L}\{t^n f(t)\} = (-1)^n F^{(n)}(s), \quad n \in \mathbb{N}. \quad (7.5)$$

Teorem 7.5 (Teorem o slici derivacije). *Ako je $\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s)$, tada je*

$$\mathcal{L}\{f'(t)\} = -f(0) + sF(s). \quad (7.6)$$

Teorem 7.6 (Teorem o slici derivacije n -tog reda). *Ako je $\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s)$, tada je*

$$\mathcal{L}\{f^{(n)}(t)\} = s^n F(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^{n-k-1} f^{(k)}(0). \quad (7.7)$$

Teorem 7.7 (Teorem o pomaku originala). *Ako je $\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s)$, a $u(t)$ Heavisideova funkcija, tada je*

$$\mathcal{L}\{f(t-a)u(t-a)\} = e^{-as}F(s). \quad (7.8)$$

Teorem 7.8 (Teorem o slici Diracove delta funkcije). *Ako je $\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s)$, tada je*

$$\mathcal{L}\{\delta(t)\} = 1. \quad (7.9)$$

Korištenjem navedenih teorema, kao i mnogih drugih, napravljene su posebne tablice koje nam prikazuju slike velikog broja funkcija. Primjer takve tablice prikazan je u tablici 7.1.

7.1. Rješavanje običnih diferencijalnih jednadžbi korištenjem Laplaceove transformacije

Pokažimo sada kako se Laplaceove transformacije koriste za rješavanje običnih diferencijalnih jednadžbi.

Razmotrimo diferencijalnu jednadžbu drugog reda u kojoj se s desne strane pojavljuje Diracova delta funkcija:

$$y'' + 3y' + 2y = \delta(t - 1) \quad (7.10)$$

s početnim uvjetima:

$$y(0) = 0, \quad y'(0) = 0. \quad (7.11)$$

Tablica 7.1. Tablica Laplaceovih transformacija

| Redni broj | $f(t)$ | $F(w) = \mathcal{L}\{f(t)\}$ |
|------------|-------------------|-----------------------------------|
| 1. | 1 | $\frac{1}{w}$ |
| 2. | e^{at} | $\frac{1}{w - a}$ |
| 3. | t^n | $\frac{n!}{w^{n+1}}$ |
| 4. | $\sin(at)$ | $\frac{a}{w^2 + a^2}$ |
| 5. | $\cos(at)$ | $\frac{w}{w^2 + a^2}$ |
| 6. | $e^{at} \sin(bt)$ | $\frac{b}{(w - a)^2 + b^2}$ |
| 7. | $e^{at} \cos(bt)$ | $\frac{w - a}{(w - a)^2 + b^2}$ |
| 8. | $t \sin(at)$ | $\frac{2aw}{(w^2 + a^2)^2}$ |
| 9. | $t \cos(at)$ | $\frac{w^2 - a^2}{(w^2 + a^2)^2}$ |

Primijenimo Laplaceovu transformaciju na obje strane diferencijalne jednadžbe. Koristimo teorem o slici derivacije, slici delta funkcije, linearnost i teorem o pomaku originala:

$$\mathcal{L}\{y''\} + 3\mathcal{L}\{y'\} + 2\mathcal{L}\{y\} = \mathcal{L}\{\delta(t - 1)\} \quad (7.12)$$

Dobivamo: Zamijenimo ove izraze u jednadžbu:

$$s^2Y(s) - sy(0) - y'(0) + 3(sY(s) - y(0)) + 2Y(s) = e^{-s}, \quad (7.13)$$

a zbog početnih uvjeta $y(0) = 0$ i $y'(0) = 0$, jednadžba postaje:

$$s^2Y(s) + 3sY(s) + 2Y(s) = e^{-s}. \quad (7.14)$$

Nadalje je:

$$Y(s)(s^2 + 3s + 2) = e^{-s}, \quad (7.15)$$

$$Y(s) = \frac{e^{-s}}{s^2 + 3s + 2}, \quad (7.16)$$

$$Y(s) = e^{-s} \left(\frac{1}{s+1} - \frac{1}{s+2} \right). \quad (7.17)$$

Inverznom Laplaceovom transformacijom slijedi

$$y(t) = u(t-1) (e^{-(t-1)} - e^{-2(t-1)}), \quad (7.18)$$

gdje je $u(t-1)$ Heavisideova stepenasta funkcija. Rješenje se može napisati i u obliku:

$$y(t) = \begin{cases} 0 & \text{za } t < 1, \\ e^{-(t-1)} - e^{-2(t-1)} & \text{za } t \geq 1. \end{cases} \quad (7.19)$$

7.2. Rješavanje sustava diferencijalnih jednadžbi korištenjem Laplaceove transformacije

Pokažimo sada na primjeru kako se Laplaceove transformacije koriste kod rješavanja sustava običnih diferencijalnih jednadžbi.

Razmotrimo sljedeći sustav linearnih diferencijalnih jednadžbi prvog reda:

$$\begin{aligned} x_1'(t) + 2x_1(t) &= 3x_2(t) + u(t), \\ x_2'(t) + 4x_2(t) &= 2x_1(t), \end{aligned} \quad (7.20)$$

gdje su $x_1(t)$ i $x_2(t)$ funkcije vremena t , a $u(t)$ je ulazna funkcija. Pretpostavimo da su početni uvjeti $x_1(0) = 0$ i $x_2(0) = 0$, te da je ulazna funkcija $u(t) = \delta(t)$

Transformiramo jednadžbe u Laplaceovu domenu, slijedi:

$$\begin{aligned} sX_1(s) + 2X_1(s) &= 3X_2(s) + 1, \\ sX_2(s) + 4X_2(s) &= 2X_1(s). \end{aligned} \quad (7.21)$$

Dobivamo sustav algebarskih jednadžbi:

$$\begin{aligned} (s+2)X_1(s) - 3X_2(s) &= 1, \\ -2X_1(s) + (s+4)X_2(s) &= 0. \end{aligned} \quad (7.22)$$

Iz druge jednadžbe izražavamo $X_2(s)$ preko $X_1(s)$:

$$X_2(s) = \frac{2}{s+4} X_1(s). \quad (7.23)$$

Zatim uvrstimo u prvu jednadžbu:

$$(s+2)X_1(s) - \frac{6}{s+4} X_1(s) = 1. \quad (7.24)$$

Pojednostavljanjem dobijamo:

$$X_1(s) \left[\frac{(s+2)(s+4) - 6}{s+4} \right] = 1, \quad (7.25)$$

$$X_1(s) = \frac{s+4}{s^2+6s+2}. \quad (7.26)$$

Sada možemo izračunati $X_2(s)$:

$$X_2(s) = \frac{2}{s+4} X_1(s) = \frac{2}{s+4} \cdot \frac{s+4}{s^2+6s+2} = \frac{2}{s^2+6s+2}. \quad (7.27)$$

Na kraju primjenjujemo inverznu transformaciju kako bismo dobili rješenja $x_1(t)$ i $x_2(t)$ u vremenskoj domeni.

$$x_1(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{s+4}{s^2+6s+2} \right\}, \quad (7.28)$$

$$x_2(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{2}{s^2+6s+2} \right\}. \quad (7.29)$$

8. Sustavi običnih diferencijalnih jednačbi u inženjerstvu

U ovom ćemo poglavlju na nekoliko primjera prikazati primjene sustava običnih diferencijalnih jednačbi u inženjerstvu. U prvom primjeru prikazujemo primjenu običnih diferencijalnih jednačbi na problem oscilatora koji u drugom primjeru proširujemo na sustav opruga koji se modelira sustavom običnih diferencijalnih jednačbi.

Primjer 8.1. Razmotrimo prigušeno gibanje harmonijskog oscilatora pod utjecajem vanjske sile:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t), \quad (8.1)$$

gdje je $m = 1$ masa oscilatora, $c = 0.5$ koeficijent prigušenja, $k = 4$ krutost oscilatora, dok je vanjska sila opisana funkcijom $F(t) = 2 \sin(t)$. Pretpostavit ćemo da je $x(0) = 1$ i $\dot{x}(0) = 0$, čime smo zadali početni položaj i početnu brzinu, odnosno početne uvjete.

Ovu ćemo jednačbu riješiti Laplaceovim transformacijama. Primijenimo li Laplaceovu transformaciju na obje strane diferencijalne jednačbe (8.1) dobivamo:

$$s^2 X(s) - sx(0) - \dot{x}(0) + c(sX(s) - x(0)) + kX(s) = \mathcal{L}\{F(t)\} \quad (8.2)$$

Zbog početnih uvjeta je

$$s^2 X(s) - s \cdot 1 + 0 + 0.5(sX(s) - 1) + 4X(s) = \frac{2}{s^2 + 1}, \quad (8.3)$$

odakle slijedi

$$s^2 X(s) + 0.5sX(s) + 3.5X(s) = \frac{2}{s^2 + 1} + s, \quad (8.4)$$

$$X(s)(s^2 + 0.5s + 3.5) = \frac{2 + s(s^2 + 1)}{s^2 + 1}, \quad (8.5)$$

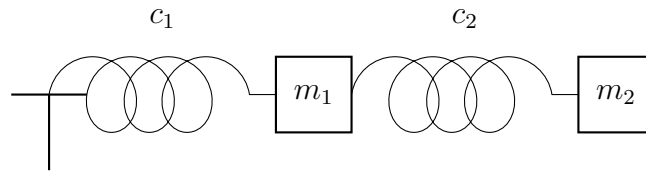
$$X(s)(s^2 + 0.5s + 3.5) = \frac{s^3 + s + 2}{s^2 + 1}, \quad (8.6)$$

$$X(s) = \frac{s^3 + s + 2}{(s^2 + 1)(s^2 + 0.5s + 3.5)}. \quad (8.7)$$

Primijenimo inverznu Laplaceovu transformaciju na ovaj izraz, dobivamo:

$$x(t) = e^{-0.25t} (1.5 \sin(t) + 0.5 \cos(t)) + \sin(t). \quad (8.8)$$

Primjer 8.2. Mase $m_1 = 2$ i $m_2 = 1$ obješene su na oprugama s koeficijentima prigušenja $c_1 = 4$ i $c_2 = 3$ kako je prikazano na slici 8.1. Masa m_1 je povezana s fiksnom točkom pomoću opruge s konstantom elastičnosti c_1 , dok je masa m_2 povezana s masom m_1 preko opruge s konstantom elastičnosti c_2 . Odredimo sustav običnih diferencijalnih jednačbi koji modelira opisanu situaciju.



Slika 8.1. Sustav opruga.

Prema drugom Newtonovom zakonu za ovaj sustav vrijede jednadžbe

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -c_1 x_1 + c_2 (x_2 - x_1) \\ m_2 \ddot{x}_2 &= -c_2 (x_2 - x_1), \end{aligned}$$

gdje su x_1 i x_2 položaji masa m_1 i m_2 , a \ddot{x}_1 i \ddot{x}_2 njihova ubrzanja. Prva jednadžba opisuje gibanje mase m_1 , koja je pod utjecajem opruge c_1 pričvršćene za fiksnu točku, te opruge c_2 koja ju povezuje s masom m_2 . Druga jednadžba opisuje gibanje mase m_2 , koja je pod utjecajem samo opruge c_2 .

Uvrstimo li zadane vrijednosti dobijemo sustav koji izgleda

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= -\frac{7}{2}x_1 + \frac{3}{2}c_2 \\ \ddot{x}_2 &= 3x_1 - ex_2 \end{aligned}$$

odnosno u matričnom obliku

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{7}{2} & \frac{3}{2} \\ 3 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}. \quad (8.9)$$

Kako smo opisali u poglavlju o primjeni matrične metode, ovaj sustav rješavamo supstitucijom $x = ye^{\omega t}$, odnosno $\ddot{x} = y\omega^2 e^{\omega t}$. Označimo li $\omega^2 = \lambda$, razmatramo jednadžbu za λ oblika:

$$\begin{vmatrix} -\frac{7}{2} - \lambda & \frac{3}{2} \\ 3 & -3 - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (8.10)$$

odnosno

$$2\lambda^2 + 13\lambda + 12 = 0. \quad (8.11)$$

Rješenja ove jednadžbe su $\lambda_1 \approx 1,11$, $\lambda_2 \approx 5,39$, a od tuda slijedi da je $\omega_{1,2} \approx \pm 1,05i$, $\omega_{3,4} \approx \pm 2,32$. Stoga je opće rješenje

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0.63 \\ 1 \end{bmatrix} (K_1 e^{1,05it} + K_2 e^{-1,05it}) + \begin{bmatrix} -0.80 \\ 1 \end{bmatrix} (K_3 e^{2,32it} + K_4 e^{-2,32it}), \quad (8.12)$$

odnosno

$$\begin{aligned} x_1 &\approx 0.63a \cos 1,05t + 0.63b \sin 1,05t - 0.80c \cos 2,32t - 0.80d \sin 2,32t \\ x_2 &\approx a \cos 1,05t + b \sin 1,05t + c \cos 2,32t + d \sin 2,32t, \end{aligned}$$

gdje konstante a, b, c, d možemo odrediti iz početnih uvjeta ako ih nametnemo.

Prikažimo još jedan primjer primjene sustava običnih diferencijalnih jednadžbi u elektrotehnici.

Primjer 8.3. Razmotrimo serijsko-paralelni RLC krug koji se sastoji od:

- otpornika R_1 i induktora L_1 spojenih u seriju,
- kondenzatora C i otpornika R_2 spojenih paralelno s R_1 i L_1 ,
- izvora napona $V(t)$.

Struje u krugu su:

- $I_1(t)$ - struja kroz serijski spoj R_1 i L_1 ,
- $I_2(t)$ - struja kroz paralelni spoj R_2 i C .

Sustav diferencijalnih jednadžbi za struje $I_1(t)$ i $I_2(t)$ je:

$$L_1 \frac{d^2 I_1(t)}{dt^2} + R_1 \frac{dI_1(t)}{dt} = \frac{dV(t)}{dt} - \frac{I_2(t)}{C}, \quad (8.13)$$

$$\frac{dI_1(t)}{dt} = \frac{dI_2(t)}{dt} + \frac{I_2(t)}{R_2 C}. \quad (8.14)$$

9. Zaključak

Diferencijalne jednačbe predstavljaju neizostavan alat u modernoj elektrotehnici, omogućavajući inženjerima da precizno modeliraju, analiziraju i optimiziraju širok spektar električnih i elektroničkih sustava. Kroz ovaj završni rad istraženi su osnovni koncepti diferencijalnih jednačbi, metode njihovog rješavanja, te njihove konkretne primjene, s posebnim naglaskom na sustave običnih diferencijalnih jednačbi.

U radu su obrađene obične diferencijalne jednačbe i sustavi običnih diferencijalnih jednačbi, najprije s teorijskog aspekta pri čemu se definiraju opće i partikularno rješenje i navode neke temeljne klasifikacije.

Značajan dio rada posvećen je tehnikama rješavanja sustava običnih diferencijalnih jednačbi, pri čemu je naglasak stavljen na linearne sustave. Pritom su obrađene dvije temeljne metode - metoda supstitucije i matična metoda.

U radu je objašnjena i primjena Laplaceovih transformacija na rješavanje sustava običnih diferencijalnih jednačbi - tehnika koja rješavanje diferencijalnih jednačbi transformira u rješavanje algebarskih jednačbi, ali i omogućava rješavanje sustava koji uključuju kompleksne nediferencijabilne funkcije koje se klasičnim metodama ne mogu riješiti.

U zadnjem dijelu rada prikazana je i konkretna primjena sustava običnih diferencijalnih jednačbu u inženjerstvu. Može se zaključiti da su diferencijalne jednačbe i njihovi sustavi temelj za razumijevanje i analizu inženjerskih sustava, te ključni element u razvoju novih tehnologija i inovacija.

Literatura

- [1] Flajolet, P.; Gourdon, X.; Dumas, P.: "Mellin transforms and asymptotics: Harmonic sums", Theoretical Computer Science 144, pp. 3-58, 1995.
- [2] Davies, P.: "Integral Transforms and Their Applications", Springer, Berlin, 1978.
- [3] Stojković, N.: "Elektronika 1 - zavodska skripta", Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2015.
- [4] "Pierre Simon de Laplace", s Interneta, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=35431>, 05.09.2018.
- [5] "Poisson's and Laplace's equations", s Interneta, <https://ece.illinois.edu/>, 05.09.2018.
- [6] Stojković N.; Naglić V.; Mijat N.: "Teorija mreža i linija", Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2008.
- [7] Kamenarović I.: "Inženjerska matematika 1", Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 1997.
- [8] Kamenarović I.: "Matematika 3", Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 1992.

Sažetak i ključne riječi

U radu se definiraju osnovni pojmovi iz teorije običnih diferencijalnih jednažbi i sustava običnih diferencijalnih jednažbi. Objašnjava se pojam općeg i partikularnog rješenja te se navode temeljene klasifikacije sustava običnih diferencijalnih jednažbi. Prikazani su različiti načini za rješavanje sustava diferencijalnih jednažbi uz brojne primjere. Detaljno su prikazane metoda supstitucije i matična metoda, a prikazana je i primjena Laplaceovih transformacija kod rješavanja sustava običnih diferencijalnih jednažbi. Objašnjena je i primjena sustava običnih diferencijalnih jednažbi u inženjerstvu.

Ključne riječi: Obične diferencijalne jednažbe, sustavi diferencijalnih jednažbi, metoda supstitucije, matična metoda, Laplaceova transformacija

Summary and key words

The paper defines basic concepts from the theory of ordinary differential equations and systems of ordinary differential equations. The concept of general and particular solution is explained and the basic classifications of systems of ordinary differential equations are stated. Various ways to solve systems of differential equations are presented with numerous examples. The substitution method and the matrix method are presented in detail, and the application of Laplace transformations in solving systems of ordinary differential equations is also presented. The application of the system of ordinary differential equations in engineering is also explained.

Keywords: Ordinary differential equations, systems of differential equations, method of substitution, matrix method, Laplace transform.