# מבוא למשוואות דיפרנציאליות

## פרק 2 - משוואות ליניאריות מסדר שני

### תוכן העניינים


1. משוואה חסרה - שיטת הורדת סדר המשוואה ..... 1
2. משוואה לינארית, הומוגנית, עם מקדמים קבועים ..... 3
3. השוואת מקדמים בשיטת "הניחוש המושכל" ..... 5
4. השוואת מקדמים בשיטת "המרשם" ..... 7
5. וריאציית פרמטרים ..... 9
6. משוואה לינארית, עם מקדמים לא קבועים - משוואת אוילר ..... (ללא ספר)
7. משוואה לינארית כללית, שיטת הפתרון השני, שיטת אבל ..... 10
8. הוורונסקיאן ושימושיו ..... 11
9. משפט הקיום והיחידות למדר לינארית מסדר שני ..... 13
10. השיטה האופרטורית ..... 14

# משוואה חסרה – שיטת הורדת סדר המשוואה

## שאלות

פתרו את המשוואות הבאות:

1) $x^2y''+xy'=\frac{1}{x}$ $(x\neq 0)$

2) $y''\tan x-1=y'$ $(\cos x\neq 0)$

3) $2xy'y''-(y')^2+1=0$

4) $y''x\ln x=y'$

5) $xy''=x^2e^x+y'$

6) $yy''+(y')^2=0$

7) $2y''y-(y')^2=1$

8) $y''\tan y=2(y')^2$ $(\cos y\neq 0)$


כתב ופתר – גיא סלומון ©

## תשובות סופיות

1) $y=\frac{1}{x}+C_1\cdot\ln x+C_2$

2) $y=-x+C_1\cdot\cos x+C_2$

3) $y=\pm\frac{2}{3C_1}\left(C_1x+1\right)^{3/2}+C_2;\ y=\pm x+C_3$

4) $y=C_1\left(x\ln x-x\right)+C_2;\ y=C_3$

5) $y=e^x\left(x-1\right)+C_1\frac{x^2}{2}+C_2$

6) $\frac{y^2}{2}=cx+k\ \ ;\ \ y=c$

7) $y=\frac{1}{c}\left[\frac{c^2\left(x+k\right)^1}{4}+1\right]$

8) $\cot y=-\left(cx+k\right)\ \ ;\ \ y=c$


כתב ופתר – גיא סלומון ©

# משוואה לינארית הומוגנית, עם מקדמים קבועים

## שאלות

פתרו את המשוואות בשאלות **1-11**:

**1)** $y''-100y=0$

**2)** $y''-4y'=0$

**3)** $y''-8y'+7y=0$

**4)** $z(0)=1\,,\ z'(0)=1,\ 4z''+z'-5z=0$

**5)** $y''-2y'+y=0$

**6)** $4\frac{\partial^2 x}{\partial t^2}+4\frac{\partial x}{\partial t}+x(t)=0$

**7)** $y''+4y=0$

**8)** $y''+10y'+125y=0$

**9)** $y(0)=0,\ \ y'(0)=3\,;\ y''-2y'+10y=0$

**10)** $5y''+8y'+4y=0$

**11)** $$\begin{cases} y''(x)-\frac{1}{a^2}y(x)=0 \qquad (a>0) \\ y(0)=4 \\ y(\infty)=y(-\infty)=0 \end{cases}$$


כתב ופתר – גיא סלומון ©

**12)** נתונה המד"ר $yy''+(y')^2=0$.

א. הראו כי $y_1=4$ ו- $y_2=\sqrt{x}$ הם פתרונות של המד"ר.

ב. הראו כי הפתרון $z(x)=y_1(x)+y_2(x)$, אינו פתרון של המד"ר.
האם יש בכך סתירה לעקרון הסופרפוזיציה?

## תשובות סופיות

**1)** $y=c_1e^{10x}+c_2e^{-10x}$

**2)** $y=c_1+c_2e^{4x}$

**3)** $y=c_1e^{x}+c_2e^{7x}$

**4)** $z=e^{x}$

**5)** $y=c_1e^{x}+c_2xe^{x}$

**6)** $x(t)=c_1e^{\frac{-t}{2}}+c_2te^{\frac{-t}{2}}$

**7)** $y=c_1\cos 2x+c_2\sin 2x$

**8)** $y=e^{-5x}\left[c_1\cos 10x+c_2\sin 10x\right]$

**9)** $y=e^{2}\sin 3x$

**10)** $y=e^{\frac{-4x}{5}}\left[c_1\cos\left(\frac{2}{5}x\right)+c_2\sin\left(\frac{2}{5}x\right)\right]$

**11)** $y=4e^{-\frac{|x|}{a}}$

**12)** שאלת הוכחה.


כתב ופתר – גיא סלומון ©

# השוואת מקדמים בשיטת "הניחוש המושכל"

## שאלות

פתרו את המשוואות הבאות:

1) $y''+5y'+6y=22x+6x^2$

2) $y(0)=2,\ \ y'(0)=7;\ \ \ y''-2y'+y=e^{2x}$

3) $y''-y'-2y=4\sin 2x$

4) $y''-2y=xe^{-x}$

5) $y''-y=3e^{2x}\cos x$

6) $z''+z=\sin x$

7) $y''-3y'+2y=2x^2+e^x+2xe^x+4e^{3x}$

8) $y''+3y'=9x$

9) $y''-3y'+2y=e^x$

10) $y''-2y'=6x^2-2x$

11) $x''+5x'+6x=e^{-t}+e^{-2t}$

12) $y''+2y'+5y=e^{-x}\sin 2x$


כתב ופתר – גיא סלומון ©

## תשובות סופיות

1) $y = c_1 e^{-3x} + c_2 e^{-2x} + x^2 + 2x - 2$

2) $y = e^x + 4xe^x + e^{2x}$

3) $y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{-x} + \frac{1}{5}\sin 2x - \frac{3}{5}\cos 2x$

4) $y = c_1 e^{-\sqrt{2}x} + c_2 e^{\sqrt{2}x} + (2-x)e^{-x}$

5) $y = c_1 e^{-x} + c_2 e^{x} + \frac{3}{10} e^{2x}\cos x + \frac{3}{5} e^{2x}\sin x$

6) $z = c_1 \cos x + c_2 \sin x - \frac{1}{2} x\cos x$

7) $y = c_1 e^x + c_2 e^{2x} + x^2 + 3x + 3.5 - x^2 e^x - 3xe^x + 2e^{3x}$

8) $y = c_1 + c_2 e^{-3x} + \frac{3}{2}x^2 - x$

9) $y = c_1 e^x + c_2 e^{2x} - xe^x$

10) $y = c_1 e^{-3x} + c_2 e^{-2x} - x^2 - x - x^3$

11) $x = c_1 e^{-2t} + c_2 e^{-3t} + \frac{1}{2}\cdot e^{-t} + te^{-2t}$

12) $y = e^{-x}\sin 2x$


כתב ופתר – גיא סלומון ©

# השוואת מקדמים בשיטת "המרשם"

## שאלות

פתרו את המשוואות הבאות:

1) $y''+5y'+6y=22x+6x^2$

2) $y''-2y'+y=e^{2x}$ $\quad y(0)=2,\ \ y'(0)=7;$

3) $y''-y'-2y=4\sin 2x$

4) $y''-2y=xe^{-x}$

5) $y''-y=3e^{2x}\cos x$

6) $z''+z=\sin x$

7) $y''+3y'=9x$

8) $y''-3y'+2y=e^{x}$

9) $y''-2y'=6x^2-2x$

10) $x''+5x'+6x=e^{-t}+e^{-2t}$

11) $y''-3y'+2y=2x^2+e^{x}+2xe^{x}+4e^{3x}$

12) $y''+2y'+5y=e^{-x}\sin 2x$


כתב ופתר – גיא סלומון ©

## תשובות סופיות

1) $y = c_1e^{-3x} + c_2e^{-2x} + x^2 + 2x - 2$

2) $y = e^x + 4xe^x + e^{2x}$

3) $y = c_1e^{2x} + c_2e^{-x} + \frac{1}{5}\sin 2x - \frac{3}{5}\cos 2x$

4) $y = c_1e^{-\sqrt{2}x} + c_2e^{\sqrt{2}x} + (2-x)e^{-x}$

5) $y = c_1e^{-x} + c_2e^{x} + \frac{3}{10}e^{2x}\cos x + \frac{3}{5}e^{2x}\sin x$

6) $z = c_1\cos x + c_2\sin x - \frac{1}{2}x\cos x$

7) $y = c_1 + c_2e^{-3x} + \frac{3}{2}x^2 - x$

8) $y = c_1e^{x} + c_2e^{2x} - xe^{x}$

9) $y = c_1e^{-3x} + c_2e^{-2x} - x^2 - x - x^3$

10) $x = c_1e^{-2t} + c_2e^{-3t} + \frac{1}{2}\cdot e^{-t} + te^{-2t}$

11) $y = c_1e^{x} + c_2e^{2x} + x^2 + 3x + 3.5 - x^2e^{x} - 3xe^{x} + 2e^{3x}$

12) $y = e^{-x}\sin 2x$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

# וריאציית פרמטרים

## שאלות

פתרו את המשוואות הבאות:

1) $y''+y=\frac{1}{\sin x}$

2) $y''+4y'+4y=e^{-2x}\ln x$

3) $y''+2y'+y=3e^{-x}\sqrt{x+1}$

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

5) $y''-3y'+2y=\frac{1}{1+e^{-x}}$

6) $y''+4y=\sec 2x$

## תשובות סופיות

1) $y=c_1\cos x+c_2\sin x-\cos x\cdot x+\sin x\cdot\ln|\sin x|$

2) $y=c_1e^{-2x}+c_2xe^{-2x}-e^{-2x}\frac{x^2}{2}\left[\ln x-\frac{1}{2}\right]+x^2e^{-2x}\left[\ln x-1\right]$

3) $y=c_1e^{-x}+c_2xe^{-x}-e^{-x}\left[\frac{6\left(\sqrt{x+1}\right)^5}{5}-\frac{6\left(\sqrt{x+1}\right)^3}{3}\right]+xe^{-x}\left[2(x+1)^{3/2}\right]$

4) $y=e^x-xe^x+xe^x\ln x\quad(x>0)$

5) $y=c_1e^x+c_2e^{2x}+e^x\ln\left(1+e^{-x}\right)+e^{2x}\left[\ln\left(1+e^{-x}\right)-\left(1+e^{-x}\right)\right]$

6) $y=c_1\cos 2x+c_2\sin 2x+\frac{1}{4}\cos 2x\ln|\cos 2x|+\sin 2x\cdot x$


כתב ופתר – גיא סלומון ©

# משוואה לינארית כללית, שיטת הפתרון השני, שיטת אבל

## שאלות

**1)** פתרו $y''+\tan x\cdot y'-(2\tan x+4)y=0$ , כאשר ידוע $y_1(x)=e^{2x}$ .

**2)** פתרו $(1-x^2)y''+2xy'-2y=0$.

**3)** הסבירו את שיטת "הפתרון השני" לפתרון מד"ר לינארית, כללית, לא הומוגנית, מסדר שני. הדגימו על המד"ר:

$$(1-x)y''+x\cdot y'-y=2(1-x)^2e^{-x},\quad (0<x<1),$$

כאשר ידוע ש- $y_1(x)=e^x$ , פתרון של המד"ר ההומוגנית המתאימה.

## תשובות סופיות

**1)** $y=c_1e^{2x}+c_2e^{-2x}(\sin x-4\cos x)$

**2)** $y=c_1x+c_2(x^2+1)$

**3)** שאלת הדגמה.


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

# הוורונסקיאן ושימושיו

## שאלות

**1)** האם ייתכן כי $y_1(x)=e^x,\ \ y_2(x)=\sin x$ , הם שני פתרונות של המשוואה $y''+p(x)y'+q(x)y=0$ , עם מקדמים רציפים בקטע $[0,\pi]$?

**2)** הראו כי הפונקציות $y_1(x)=\sin x^2,\ \ y_2(x)=\cos x^2$ הן פתרונות בת"ל של המשוואה $xy''-y'+4x^3y=0$ , בקטע $(-4,\infty)$.

חשבו את הוורונסקיאן של הפונקציות והראו כי הוא מתאפס רק עבור $x=0$ .
דני טוען שיש בכך סתירה לטענה ידועה. מהי הטענה? והאם דני צודק?

**3)** בדיקה ישירה מראה שהפונקציות $y_1(x)=xe^x,\ \ y_2(x)=e^{-x}$ ,
הן פתרונות של המשוואה $y''-\frac{2}{1+2x}y'-\frac{2x+3}{1+2x}y=0$ , בקטע $\left(-\frac{1}{2},\infty\right)$.
האם הפונקציות הללו בת"ל בקטע?

**4)** נתונות שתי פונקציות $y_1=x^3$ , $y_2=\left|x^3\right|$ , בקטע $[-4,4]$.

א. חשבו את הוורונסקיאן של הפונקציות בקטע.

ב. בדקו האם הפונקציות תלויות לינארית בקטע.

ג. האם ייתכן כי הפונקציות הן פתרונות של אותה מד"ר הומוגנית מסדר שני בעלת מקדמים רציפים?

ד. הפונקציות הנתונות הן פתרונות של המד"ר $xy''-2y'=0$ .
האם יש בכך סתירה לתוצאה בסעיף ג'?

**5)** ענו על הסעיפים הבאים:

א. יהיו $y_1(x)$ , $y_2(x)$ פונקציות גזירות פעמיים בקטע $I$ ,
ונניח כי הוורונסקיאן שלהן שונה מאפס ב- $I$ .
הוכיחו כי קיימת משוואה הומוגנית מסדר 2, בעלת מקדמים רציפים בקטע, ש- $y_1(x)$ , $y_2(x)$ הם פתרונות שלה.

ב. רשמו משוואה הומוגנית מסדר שני עם מקדמים רציפים בקטע $x>0$ ,
שהפונקציות $y_1(x)=x^2$ , $y_2(x)=x^4$ , הן פתרונות שלה.


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

**6)** נתון כי $y_1(x),\ y_2(x)$ , הם פתרונות של המד"ר $y''(x)+p(x)y'+q(x)=0$ ,
בקטע $I$ , כאשר $p, q$ רציפות בקטע $I$ .
הראו כי אם קיימת נקודה $c$ בקטע $I$ , שעבורה $y_1(c)=y_2(c)=0$ ,
אז $\{y_1(x), y_2(x)\}$ אינה מערכת בסיסית של פתרונות המד"ר הנתונה.

## תשובות סופיות

**1)** לא.

**2)** $W=-2x$

**3)** כן.

**4)** א. $W=0$ ב. שאלת בדיקה. ג. לא. ד. לא.

**5)** א. שאלת הוכחה . ב. $y''-\frac{5}{x}y'+\frac{8}{x^2}y=0$

**6)** שאלת הוכחה.


כתב ופתר – גיא סלומון ©

# משפט הקיום והיחידות למדר לינארית מסדר שני

## שאלות

**1)** נתונה המשוואה $y''-4y=12x$ .

א. פתרו את המשוואה.

ב. מצאו פתרון המקיים: $\begin{cases} y(0)=1 \\ y'(0)=11 \end{cases}$ .

ג. נסו למצוא פתרון המקיים: $\begin{cases} y(0)=4 \\ y'(0)=2 \\ y''(0)=1 \end{cases}$ .

האם כישלונך מפריך את משפט הקיום?

ד. תנו דוגמה מפורשת לשני פתרונות שונים, המקיימים $y(0)=1$ .

האם הדוגמה מפריכה את משפט היחידות?

**2)** נתונה הבעיה: $\begin{cases} x^2y''-2xy'+2y=0 \\ y(0)=0 \\ y'(0)=0 \end{cases}$ .

הראו כי $y_1(x)=0$ ו- $y_2(x)=x^2$ , הם פתרונות של הבעיה.

האם אין בכך סתירה למשפט הקיום והיחידות?

**3)** האם קיימת משוואה דיפרנציאלית ליניארית מסדר שני, עם מקדמים רציפים בסביבת הנקודה $x=0$ , כך שהפונקציות $y=4x$ ו- $y=\sin 4x$ הן פתרונותיה?

## תשובות סופיות

**1)** א. $y=c_1e^{2x}+c_2e^{-2x}-3x$ ב. $y=4e^{2x}-3e^{-2x}-3x$

ג. המשוואות הראשונה והשלישית סותרות זו את זו. לא.

ד. לפתרון המלא עם הסברים מפורטים היכנסו לאתר.

**2)** לפתרון המלא עם הסברים מפורטים היכנסו לאתר.

**3)** לפתרון המלא עם הסברים מפורטים היכנסו לאתר.


כתב ופתר – גיא סלומון ©

# השיטה האופרטורית

**הערה: נושא זה לא נלמד בדרך כלל; בדקו עם המרצה אם הוא נדרש או לא.**

בשאלות אלו הסימון הוא: $ay''+by'+cy=Q(x) \quad \Leftrightarrow \quad (aD^2+bD+c)y=Q(x)$.

## שאלות

פתור את המשוואות הבאות:

1) $(D^2-D-2)y=4e^{-2x}+10e^{x}+11$

2) $(D^2-2D+1)y=10e^{4x}+e^{x}-1$

3) $(D^2+D-2)y=4e^{x}+e^{10x}+14$

4) $(D^2+4)y=\sin 5x$

5) $(D^2-4)y=\sin x\cos x\cos 2x$

6) $(D^2+D-2)y=\cos x-3\sin x$

7) $(D^2+2D-3)y=2\cos x\cos 2x$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

## תשובות סופיות

1) $y = c_1e^{2x} + c_2e^{-x} + e^{-2x} - 5e^x - 5.5$

2) $y = c_1e^x + c_2xe^x + \frac{10}{9}e^{4x} + x^2e^x - 1$

3) $y = c_1e^x + c_2e^{2x} - 4xe^x + \frac{1}{72}e^{10x} + 7$

4) $y = c_1\cos 2x + c_2\sin 2x - \frac{1}{21}\sin 5x$

5) $y = c_1e^{2x} + c_2e^{-2x} - \frac{1}{80}\sin 4x$

6) $y = c_1e^x + c_2e^{-2x} + \sin x$

7) $y = c_1e^x + c_2e^{-3x} + \frac{1}{10}\sin x - \frac{1}{5}\cos x + \frac{1}{30}\sin 3x - \frac{1}{15}\cos 3x$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©