התמרת לפלס

פרופ' נח דנא-פיקארד

סיון תשע"ה

מוטיבציה

- התמרת לפלס נותנת שיטה לפתרן משוואות דיפרנציאליות ע״י הפיכתן למשוואות אלגבריות.
- השיטה נקראת על שמו של המתמטיקאי הצרפתי Pierre Simon de Laplace (1749-1827).
- יש לה שימושים אחרים, לא רק אלה שנלמד בפרק הזה. תגלו אותם (לפחות חלקם) בקורסים אחרים (פיזיקה וכו׳)

Pierre-Simon de Laplace

- **Born 23 :March 1749 in Beaumont-en-Auge, Normandy, France**
  Died 5 :March 1827 in Paris, France

הגדרה

- **תהי f פונקציה ממשית של המשתנה הממשי . נגדיר:**

$$\mathfrak{L}\{f(t)\}(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t)\,dt = \lim_{\lambda\to\infty}\int_0^{\lambda} e^{-st} f(t)\,dt$$

- **אם האינטגרל הלא אמיתי הזה מתכנס, התוצאה היא פונקציה של המשתנה הממשי s כך ש- $s>0$.**
- **הפונקציה הזאת נקראת *התמרת לפלס* של הפונקציה f.**
- **הסימון הסטנדרטי הוא: $F(s) = \mathfrak{L}\{f(t)\}(s)$.**
- שימו לב: הפונקציה f היא פונקציה של המשתנה t (בפיזיקה, הוא הזמן), אבל הפונקציה F היא פונקציה של המשתנה s (בפיזיקה, הפזה).

דוגמא 1

- נתון $f(t) = t$
- אזי:

$$F(s) = \int_0^{+\infty} e^{-st} f(t)\,dt = \int_0^{+\infty} t\,e^{-st}\,dt$$

$$= \lim_{\lambda \to +\infty} \int_0^{\lambda} t\,e^{-st}\,dt$$

$$= \lim_{\lambda \to +\infty} \left[\frac{-(1+st)e^{-st}}{s^2} \right]_0^{\lambda}$$

$$= \lim_{\lambda \to +\infty} \left(\frac{-(1+s\lambda)e^{-s\lambda}}{s^2} + \frac{1}{s^2} \right)$$

$$= \frac{1}{s^2}.$$

דוגמא 2

- נתון $f(t)=e^{at}, a\in R$
- אזי, אם $s>a$:

$$F(s)=\int_0^{+\infty}e^{-st}f(t)\,dt=\int_0^{+\infty}e^{at}e^{-st}\,dt=\int_0^{+\infty}e^{(a-s)t}\,dt$$

$$=\lim_{\lambda\to+\infty}\int_0^{\lambda}e^{(a-s)t}\,dt$$

$$=\lim_{\lambda\to+\infty}\left[\frac{e^{(a-s)t}}{a-s}\right]_0^{\lambda}$$

$$=\lim_{\lambda\to+\infty}\left(\frac{e^{(a-s)\lambda}}{a-s}-\frac{1}{a-s}\right)$$

$$=\frac{1}{s-a}.$$

פקודות Maple - 1

- with(inttrans);
- laplace(expression,t,s,[options]);

```
> with(inttrans):
> laplace(exp(t)+t^2,t,s);
```

$$\frac{1}{s-1}+\frac{2}{s^{3}}$$

```
> laplace(t^2*sin(t),t,s);
```

$$\frac{2\,(3\,s^{2}-1)}{(s^{2}+1)^{3}}$$

```
> laplace(y(t)=t-exp(2*t),t,s);
```

$$\mathit{laplace}(y(t),t,s)=\frac{1}{s^{2}}-\frac{1}{s-2}$$

```
> laplace(diff(y(t),t)+y(t)=exp(t)*sin(2*t),t,s);;
```

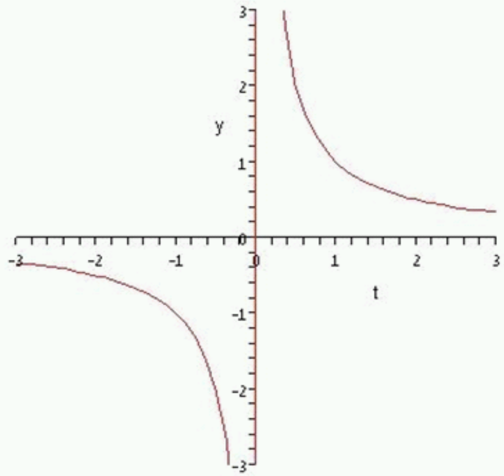
$$s\,\mathit{laplace}(y(t),t,s)-y(0)+\mathit{laplace}(y(t),t,s)=\frac{2}{s^{2}-2\,s+5}$$

```
> laplace(Heaviside(t-2)*sin(t),t,s);
```

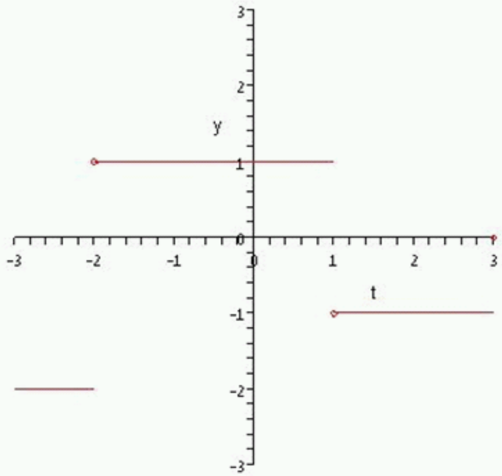
$$\frac{e^{(-2\,s)}\,(\cos(2)+\sin(2)\,s)}{s^{2}+1}$$

פונקציה רציפה בחלקים

- אומרים שהפונקציה f **רציפה בחלקים** בקטע I נתון אם היא מקיימת את התנאים הבאים :
  1. יש לה מספר סופי של נקודות אי-רציפות
  2. כל נקודת אי-רציפות היא נקודת קפיצה, ז״א שיש לפונקציה f בנקודת אי-רציפות שני גבולות חד-צדדיים סופיים.



אי-רציפות שאיננה קפיצה (סוג שני)



קפיצות ב- -2 וב- 1

משפט קיום

תהי f פונקציה רציפה בחלקים על הקטע $[0,\infty)$.
נניח שהיא מקיימת את אי-השוויון $|f(t)| \le Me^{at}$ אם $t \ge T$, כאשר a, M, T
הם מספרים ממשיים לא שליליים נתונים.
אזי $\mathfrak{L}\{f(t)\}(s)$ קיימת ומוגדרת לכל $s > a$.

- דוגמא :

א. נתון $f(t) = e^t$. תנאי משפט הקיום מתקיימים : קחו $a = 1, M = 1$ ו- $T = 0$.
לכן יש התמרת לפלס לפונקציה הנתונה. את החישוב עשינו לעיל.

עוד דוגמא

ב. נתון $f(t)=t^n$ כאשר n הוא מספר טבעי. נוכיח שלכל $t>0$, $f(t)\le n!e^t$.

בשביל זה נשתמש בטור מקלורין של הפונקציה המעריכית: $e^t=1+t+\frac{1}{2!}t^2+\ldots+\frac{1}{n!}t^n+\ldots$.

אם $t>0$, כל איברי הסכום חיוביים. מכאן ש- $e^t\ge\frac{t^n}{n!}$ ואי-השוויון המבוקש התקבל.

לכן יש התמרת לפלס לפונקציה הנתונה. את החישוב מבצעים בעזרת הוכחה באינדוקציה.

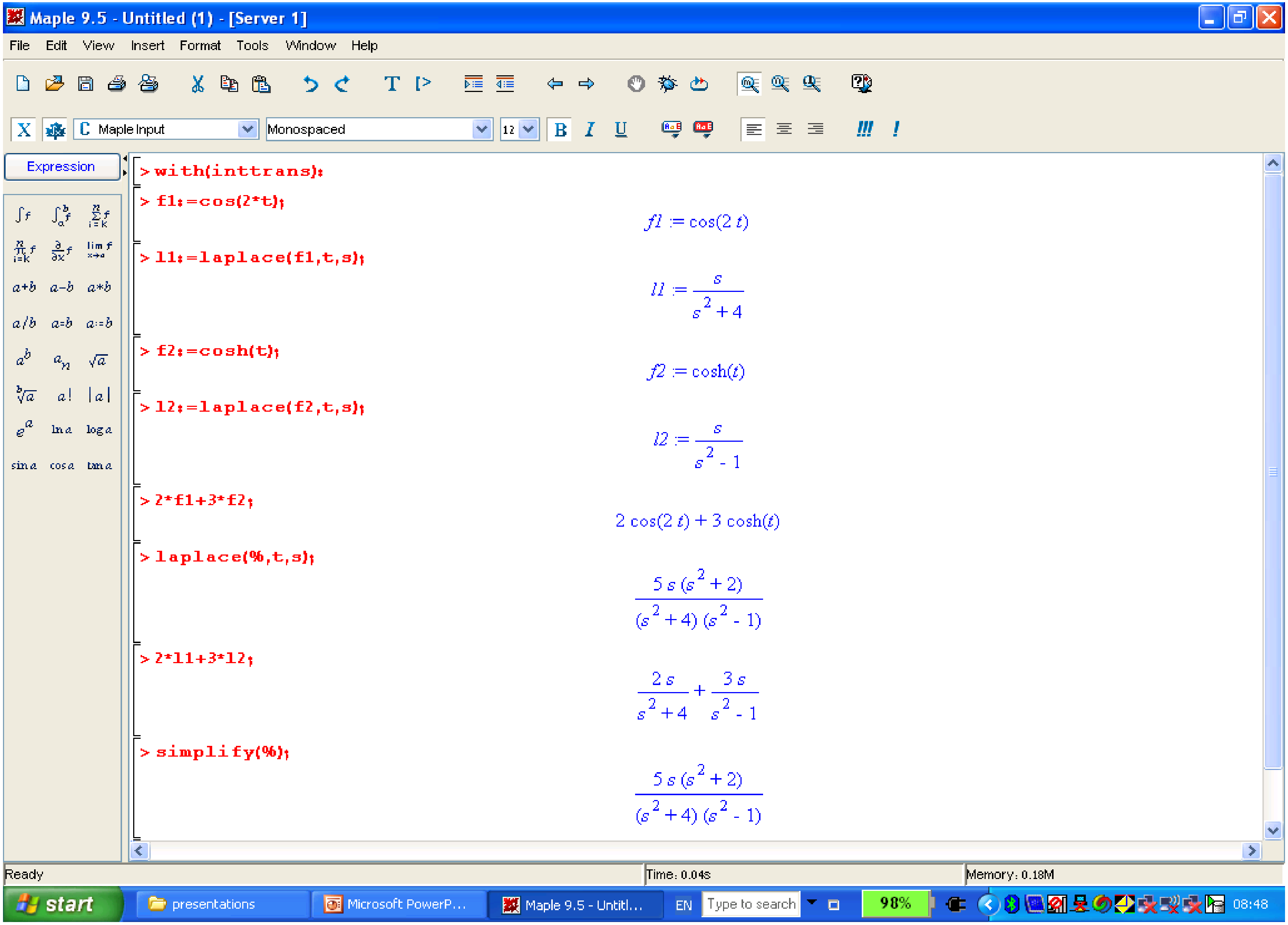
הלינאריות של התמרת לפלס

נתונות שתי פונקציות f ו- g של המשתנה הממשי t.
נניח שיש לשתי הפונקציות האלה התמרת לפלס.

אזי לכל שני מספרים ממשיים α ו- β, יש התמרת לפלס לפונקציה $\alpha f + \beta g$, ומתקיים:

$$\mathfrak{L}\{ (\alpha f + \beta g)(t) \}(s) = \mathfrak{L}\{\alpha f(t)\}(s) + \mathfrak{L}\{\beta g(t)\}(s)$$

- דוגמא : בשקף הבא, בעזרת Maple


Maple 9.5 - Untitled (1) - [Server 1]
> with(inttrans);
> f1:=cos(2*t);
f1 := cos(2 t)
> l1:=laplace(f1,t,s);
l1 := s/(s^2 + 4)
> f2:=cosh(t);
f2 := cosh(t)
> l2:=laplace(f2,t,s);
l2 := s/(s^2 - 1)
> 2*f1+3*f2;
2 cos(2 t) + 3 cosh(t)
> laplace(%,t,s);
5 s (s^2 + 2)/((s^2 + 4) (s^2 - 1))
> 2*l1+3*l2;
2 s/(s^2 + 4) + 3 s/(s^2 - 1)
> simplify(%);
5 s (s^2 + 2)/((s^2 + 4) (s^2 - 1))

התמרת לפלס הפוכה

ניקח פונקציה f של המתנה t שיש לה התמרת לפלס ונסמן $G(s) = \mathfrak{L}\{f(t)\}(s)$.

הפונקציה f תיקרא **התמרת לפלס הפוכה** של G. היא תסומן ב- $\mathfrak{L}^{-1}\{G(s)\}(t)$

לדוגמא $e^{2t} = \mathfrak{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s-2}\right\}(t)$.

הליניאריות של התמרת לפלס הפוכה

התמרת לפלס הפוכה היא ליניארית, כלומר בתנאים המתאימים, מתקיים:

$$\mathfrak{L}^{-1}\{\,(\alpha F+\beta G)(s)\,\}(s) = \mathfrak{L}^{-1}\{\alpha F(s)\}(t) + \mathfrak{L}^{-1}\{\,\beta G(s)\,\}(t).$$

- **דוגמא :**

נתון $F(s)=\dfrac{2s}{(s-1)(s-4)}$. על מנת לחשב את התמרת לפלס ההפוכה של $F(s)$, נפרק את השבר לשברים פשוטים:

$$F(s)=\frac{8}{3(s-4)}-\frac{2}{3(s-1)} = F(s)=\frac{8}{3}\cdot\frac{1}{(s-4)}-\frac{2}{3}\cdot\frac{1}{(s-1)}$$

ידוע ש- $\mathfrak{L}^{-1}\left\{\dfrac{1}{s-4}\right\}(t)=e^{4t}$ ושו- $\mathfrak{L}^{-1}\left\{\dfrac{1}{s-1}\right\}(t)=e^{t}$. בגלל הליניאריות של ההתמרה ההפוכה מתקבל:

$$\mathfrak{L}^{-1}\{F(s)\}(t)=\frac{8}{3}e^{4t}-\frac{2}{3}e^{t}\,.$$

עוד דוגמא של התמרת לפלס הפוכה

נתון $F(s)=\dfrac{2s+1}{s^2+9}$. נפרק את השבר לסכום של שני שברים :

$$F(s)=\frac{2s}{s^2+9}+\frac{1}{s^2+9}$$

האיבר הראשון דומה להתמרת לפלס של cos, השני דומה להתמרת לפלס של sin. דרושות רק התאמות קטנות של המקדמים :

$$F(s)=\frac{2s}{s^2+9}+\frac{1}{s^2+9} = 2\cdot\frac{s}{s^2+9}+\frac{1}{3}\cdot\frac{3}{s^2+9}$$

ובגלל הליניאריות של התמרת לפלס ההפוכה מתקבל :

$$\mathfrak{L}^{-1}\{F(s)\}(t)=2\ \mathfrak{L}^{-1}\left\{\frac{s}{s^2+9}\right\}(t)+\frac{1}{3}\ \mathfrak{L}^{-1}\left\{\frac{3}{s^2+9}\right\}(t)$$

$$=\ 2\sin 3t+\frac{1}{3}\cos 3t\ .$$

דוגמאות נוספות

- דוגמא 1 :

$$F(s) = \frac{4s - 1}{s^2 - 5x + 6}$$

- דוגמא 2 :

$$F(s) = \frac{2s + 16}{s^2 + 4s + 13}$$

משפט הזזה ראשון

נניח ש- $\mathfrak{L}\{f(t)\}(s) = F(s)$ קיימת עבור $s > b$.
אם a הוא מספר ממשי נתון, אזי
$$\mathfrak{L}\{e^{at}f(t)\}(s) = F(s-a),\ s>a+b.$$

- דוגמא:

ידוע ש- $\mathfrak{L}\{\sin 2t\}(s) = \dfrac{2}{s^2+4}$.

לכן $\mathfrak{L}\{e^{5t}\sin(2t)\}(s) = \dfrac{2}{(s-5)^2+4}$.

התמרת לפלס של הנגזרת ראשונה של פונקציה

נניח ש:

א. הפונקציה $f(t)$ מקיימת את תנאי משפט הקיום (נשתמש בסימונים של המשפט ההוא);

ב. הפונקציה f גזירה ו- f' רציפה בחלקים על הקטע $[0,+\infty)$.

אזי: יש התמרת לפלס עבור הפונקציה f', ומתקיים:

$$\mathfrak{L}\{\ f'(t)\ \}(s) = s\,\mathfrak{L}\{\ f(t)\}(s) - f(0),\ s>a$$

- דוגמא:

אם $f(t)=\sin t$, אזי $f'(t)=\cos t$. ידוע ש-

$$\mathfrak{L}\{\ \sin t\ \}\ (s) = \frac{1}{s^2+1} \quad \text{ו-} \quad \mathfrak{L}\{\ \cos t\ \}\ (s) = \frac{s}{s^2+1}$$

אכן מתקיים:

$$\frac{s}{s^2+1} = s\ \frac{1}{s^2+1} - \sin 0.$$

יישום

- חשב את התמרת לפלס הפוכה של הפונקציה הנתונה להלן :

$$F(s) = \ln\frac{s+2}{s-5}$$

רמז : אפשר לגזור משהו?

התמרת לפלס של הנגזרת מסדר n של פונקציה נתונה

נניח ש :

א. הפונקציה $f(t)$ גזירה לפחות n פעמים כאשר $t \ge 0$

ב. כל הנגזרות $f^{(k)}(t)$ מקיימות את תנאי משפט הקיום (כאשר $k = 0,1,2,\dots,n-1$

ג. הנגזרת $f^{(n)}(t)$ רציפה בחלקים על הקטע $[0,+\infty)$.

אזי יש התמרת לפלס עבור $f^{(n)}(t)$ ומתקיים:

$$\mathfrak{L}\{\ f^{(n)}(t)\ \}(s) = s^n\ \mathfrak{L}\{\ f(t)\ \}(s) - s^{n-1}\ f(0) - s^{n-2}\ f'(0) - \dots - f^{(n-1)}(0).$$

- דוגמא :

אם $f(t) = \sin t$, אזי $f^{(4)}(t) = \sin t$ ואכן :

$$\mathfrak{L}\{\ \sin t\ \}\ (s) = \frac{1}{s^2+1} = s^4\ \mathfrak{L}\{\ \sin t\ \}\ (s) - s^3 \sin 0 - s^2 \cos 0 + s \sin 0 + \cos 0$$

פתרון משוואה דיפרנציאלית עם תנאי התחלתי בעזרת התמרת לפלס

1. נתונה משוואה דיפרנציאלית שבה הנעלם הוא $y(t)$.
2. ע"י המרת לפלס של שני האגפים של המשוואה
3. מקבלים משוואה אלגברית בעלת נעלם $Y(s)$
4. מבצעים שינויים בעזרת כללים אלגבריים (פירוק לשברים פשוטים וכו'), על מנת לכתוב את $Y(s)$ כצירוף ליניארי של "שברים ידועים".
5. ע"י התמרת לפלס הפוכה, מוצאים את $y(t)$.

דוגמא

מצא את הפתרון של המשוואה הדיפרנציאלית $y''(t)-9y(t)=0$ עם התנאי ההתחלתי $y(0)=0, y'(0)=1$.

א.
$$\mathfrak{L}\{\, y''(t)-9y(t)\ \}=0$$
$$s^2\ \mathfrak{L}\{y(t)\}(s)-s\,y'(0)-y\,(0)-9\ \mathfrak{L}\{y(t)\}(s)\ =0$$
$$s^2Y\,(s)-s\,y\,(0)-y\,'\,(0)-9Y(s)=0$$
$$Y(s)=\frac{1}{s^2-9}\ .$$

ב. נפרק את $Y(s)=\dfrac{1}{s^2-1}$ לשברים פשוטים:

$$Y(s)=\frac{1}{6}\cdot\frac{1}{s-3}-\frac{1}{6}\cdot\frac{1}{s+3}$$

ג. הפתרון:

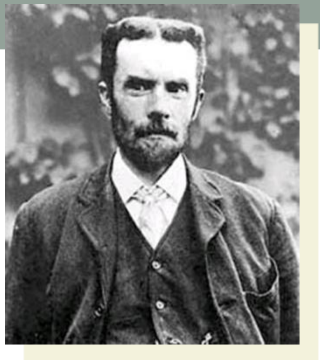
$$y(t)=\frac{1}{6}\ \mathfrak{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s-3}\right\}(t)\ -\ \frac{1}{6}\ \mathfrak{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s+3}\right\}(t)\ =\ \frac{1}{6}e^{3t}-\frac{1}{6}e^{-3t}\ .$$

דוגמאות נוספות

$$\begin{cases} y''-y = t-2 \\ y(2)=3,\ y'(2)=0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt}+5y = e^{-t} \\ y(0)=2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} y'''-y''+y'-y = 0 \\ y(0)=y'(0)=1,\ y''(0)=3 \end{cases}$$



Oliver Heaviside
1850 - 1925

פונקצית היביסייד (Heaviside)
unit-step function

- **פונקצית היביסייד (Heaviside):**

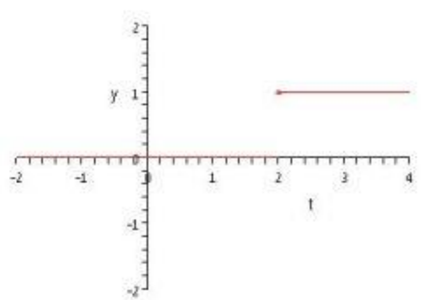
נסמן אותה באות u. היא מוגדרת ע"י

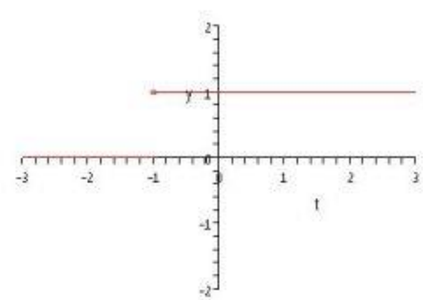
$$\begin{cases} u(t)=0, t<0 \\ u(t)=1, t\geq 0 \end{cases}$$

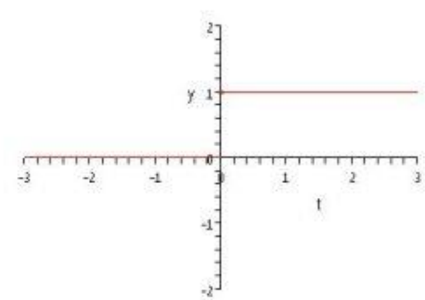
- **פונקצית Heaviside מוזזת:**

$$\begin{cases} u(t-a)=0, t<a \\ u(t-a)=1, t\geq a \end{cases}$$

- גרפים:



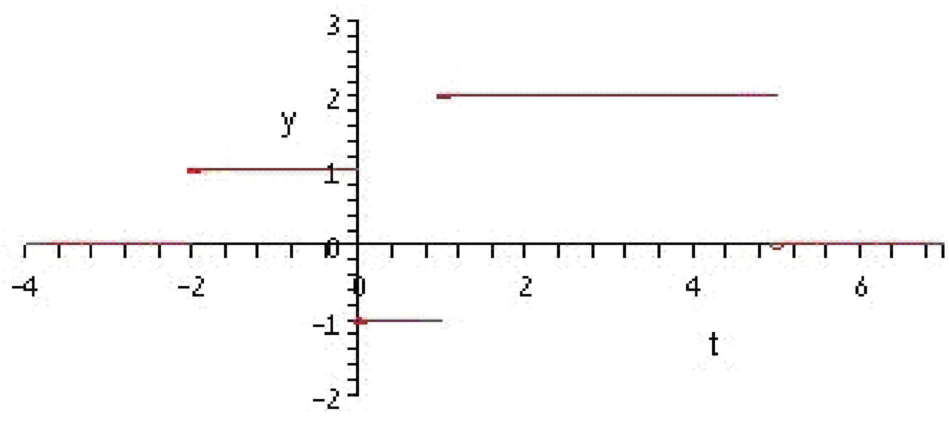




פונקציה במדרגות

היא פונקציה f המקיימת את התנאים הבאים :

- היא רציפה בכל התחום שלה, פרט לקבוצה דיסקרטית של נקודות אי-רציפות (בעצם קפיצות).
- בין שתי נקודות אי-רציפות, הפונקציה קבועה.



התמרת לפלס של פונקצית Heaviside (מוזזת או לא)

$$\mathfrak{L}\{u(t-a)\}(s)=\int_0^{\infty}e^{-st}u(t-a)\,dt=\int_a^{\infty}e^{-st}\,dt=\frac{e^{-as}}{s}$$

בטאו את הפונקציה הנתונה בעזרת פונקצית Heaviside וחישבו את התמרת לפלס שלה.

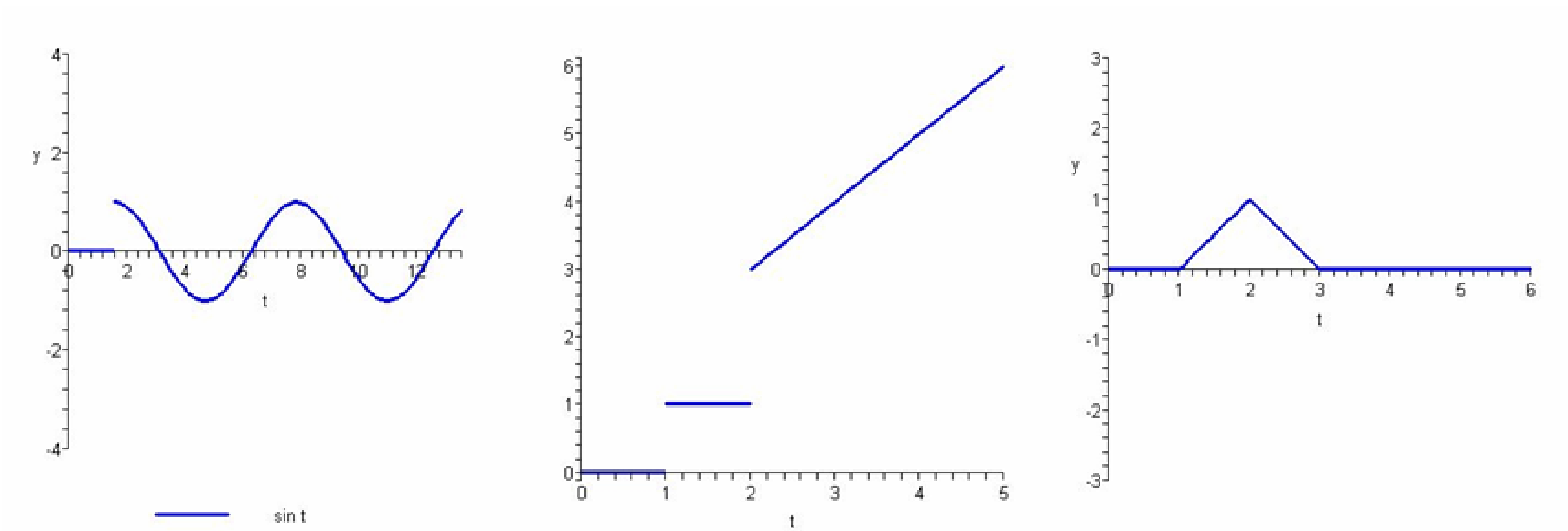
א. $g(t)=\begin{cases}0, & 0<t<1\\ 1, & 1<t<2\\ -2, & t>2\end{cases}$

ב. $g(t)=\begin{cases}0, & 0<t<3\\ t+1, & t>3\end{cases}$

ג. הפונקציה נתונה ע"י הגרף (ב)

ד. הפונקציה נתונה ע"י הגרף (א).

ה. הפונקציה הנתונה ע"י הגרף (ג).



(א) (ב) (ג)

יישום – פתרון משוואה דיפרנציאלית

- דוגמא 1 :

$$\begin{cases} w''-w = u(t)+u(t-2) \\ w(0)=1,\ w'(0)=2 \end{cases}$$

- דוגמא 2 :

$$\begin{cases} y''+y = g(t) \\ y(0)=-1,\ y'(0)=0 \end{cases}$$

כאשר

$$g(t)=\begin{cases} t,\ t<2 \\ 5,\ t>2 \end{cases}$$

משפט הזזה שני

יהי $a>0$ **. אם ל-** $f(t)$ **יש התמרת לפלס, אזי ל-** $f(t)u(t-a)$ **יש התמרת לפלס ומתקיים:**

$$\mathfrak{L}\{f(t-a)u(t-a)\}(s) = e^{-as}\ \mathfrak{L}\{f(t)\}(s).$$

- דוגמא: התמרת לפלס של פונקציה עם קפיצה אחת

נתון $f(t)=\begin{cases} t^2, 0\le t<2\pi \\ t^2+\sin t, t\ge 2\pi \end{cases}$.

לפונקציה הזאת נקודת קפיצה ב- π. ניתן לכתוב:

$$f(t)=u(t)t^2+u(t-2\pi)\sin t = u(t)t^2+u(t-2\pi)\sin(t-2\pi).$$

עפ"י משפט ההזזה השני מתקבל:

$$\mathfrak{L}\{f(t)\}(s)=\frac{2}{s^3}+\frac{e^{-2\pi s}}{s^2+1}$$

פונקציות מחזוריות

תהי $f(t)$ פונקציה רציפה בחלקים בקטע $[0,T]$ ומחזורית בעלת מחזור השווה ל- T.
אזי יש ל- $f(t)$ התמרת לפלס, והיא נתונה ע"י הנוסחה הבאה:

$$\mathfrak{L}\{f(t)\}(s)=\frac{\int_0^T e^{-st}f(t)\,dt}{1-e^{-sT}}.$$

דוגמא:

לחשב את התמרת לפלס של הפונקציה המוגדרת ע"י $f(t)=\begin{cases}\cos t, & 2\pi k\le t<(2k+1)\pi\\ -\cos t, & (2k+1)\pi\le t<(2k+2)\pi\end{cases}$.

שימו לב למחזוריות של הפונקציה.

הפונקציה f רציפה על R כולו ובעלת מחזור השווה ל-π. לכן

$$\mathfrak{L}\{f(t)\}(s)=\frac{\int_0^\pi e^{-st}\cos t\,dt}{1-e^{-\pi s}}=\frac{1}{1-e^{-s\pi}}\left(\frac{se^{-\pi s}}{s^2+1}+\frac{s}{s^2+1}\right)$$

$$=\frac{1+e^{-\pi s}}{1-e^{-\pi s}}\cdot\frac{s}{s^2+1}=\frac{s}{s^2+1}\coth\left(\frac{\pi s}{2}\right).$$

טבלה קצרה של התמרות לפלס

$f(t)$	$F(s)$		$f(t)$	$F(s)$
t^n	$\frac{n!}{s^{n+1}}$		$e^{at}\sinh bt$	$\frac{b}{(s-a)^2-b^2}$
e^{at}	$\frac{1}{s-a}$		$e^{at}\cosh bt$	$\frac{s-a}{(s-a)^2-b^2}$
$\sin at$	$\frac{a}{s^2+a^2}$		$t\sin at$	$\frac{2as}{(s^2+a^2)^2}$
$\cos at$	$\frac{s}{s^2+a^2}$		$t\cos at$	$\frac{s^2-a^2}{(s^2+a^2)^2}$
$\sinh at$	$\frac{a}{s^2-a^2},\ s>\|a\|$		$\sin at - at\cos at$	$\sin at - at\cos at$
$\cosh at$	$\frac{s}{s^2-a^2},\ s>\|a\|$		$u(t-a)$	$\frac{e^{-as}}{s}$
$e^{at}\sin bt$	$\frac{b}{(s-a)^2+b^2}$		$\delta(t-a)$	e^{-as}
$e^{at}\cos bt$	$\frac{s-a}{(s-a)^2+b^2}$			

פתרון משוואה דיפרנציאלית בעזרת התמרת לפלס (כאילו ידנית)

```
> with(inttrans):
> ode:=diff(y(t),t)+y(t)=Heaviside(t-2);
```

$$ode := \left(\frac{d}{dt}y(t)\right) + y(t) = \mathrm{Heaviside}(t-2)$$

```
> laplace(ode,t,s);
```

$$s\, laplace(y(t), t, s) - y(0) + laplace(y(t), t, s) = \frac{\mathrm{e}^{(-2\,s)}}{s}$$

```
> solve(%,laplace(y(t),t,s));
```

$$\frac{y(0)\, s + \mathrm{e}^{(-2\,s)}}{s\,(s+1)}$$

```
> invlaplace(%,s,t);
```

$$y(0)\,\mathrm{e}^{(-t)} + \mathrm{Heaviside}(t-2)\,(1 - \mathrm{e}^{(-t+2)})$$

פתרון אותה משוואה דיפרנציאלית בעזרת הפקודה dsolve

```
> restart;with(inttrans):
> ode:=diff(y(t),t)+y(t)=Heaviside(t-2);
```

$$ode := \left(\frac{d}{dt}y(t)\right) + y(t) = \mathrm{Heaviside}(t-2)$$

```
> dsolve(ode);
```

$$y(t) = \mathrm{Heaviside}(t-2) - \mathrm{Heaviside}(t-2)\,\mathbf{e}^{(-t+2)} + \mathbf{e}^{(-t)}\,\_C1$$

```
> ini:=y(0)=3;
```

$$ini := y(0) = 3$$

```
> dsolve({ode,ini},y(t));
```

$$y(t) = \mathrm{Heaviside}(t-2) - \mathrm{Heaviside}(t-2)\,\mathbf{e}^{(-t+2)} + 3\,\mathbf{e}^{(-t)}$$

שימו לב: בשקף הקודם, לא היה תנאי התחלתי. כאן פעם אין, פעם יש תנאי התחלתי.

התנאי ההתחלתי קובע מקדם מסוים. מי הוא?

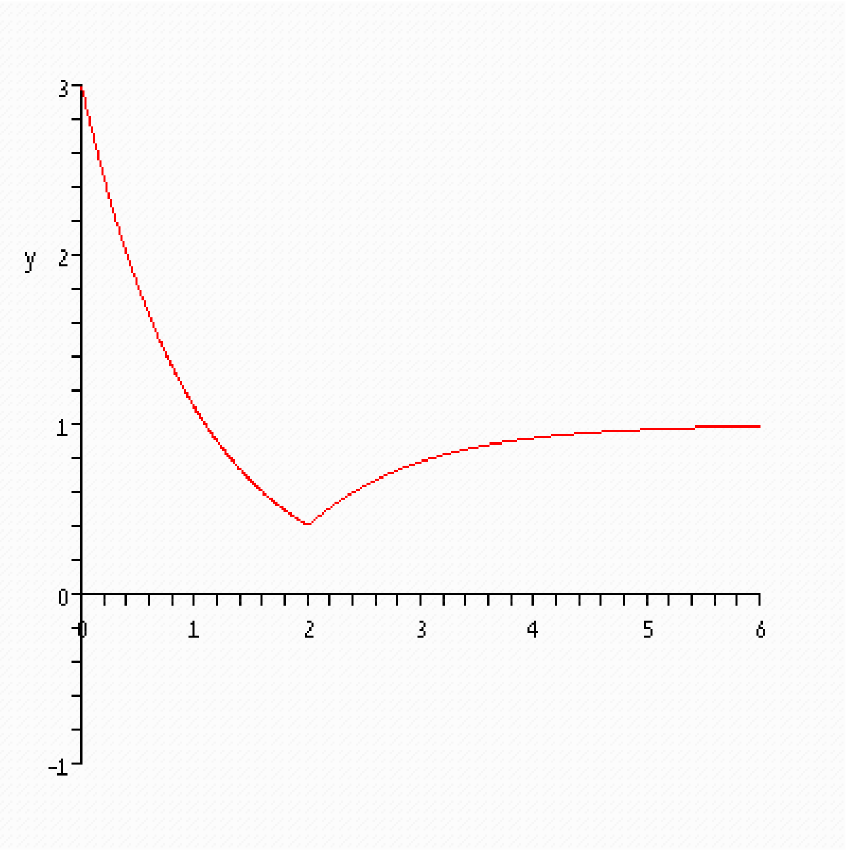
פתרון ושרטוט עקומה אינטגרלית

restart: with(inttrans):

```
> ode:=diff(y(t),t)+y(t)=Heaviside(t-2);ini:=y(0)=3;
> dsolve(ode);
> dsolve({ode,ini},y(t));
> sol:=unapply(rhs(%),t);
```

- plot(sol,0..6,y=-1..3,numpoints=800);

שימו לב לנקודת החוד



לפעמים צריך לנתח יותר את מה שכותבים: מה קרה כאן?

```
> with(inttrans):
> ode:=diff(y(t),t)+y(t)=abs(sin(t));
```

$$ode := \left(\frac{d}{dt}y(t)\right) + y(t) = |\sin(t)|$$

```
> laplace(ode,t,s);
```

$$s\,laplace(y(t), t, s) - y(0) + laplace(y(t), t, s) = \frac{\coth\left(\frac{1}{2}\pi s\right)}{s^2+1}$$

```
> solve(%,laplace(y(t),t,s));
```

$$\frac{y(0)\,s^2 + y(0) + \coth\left(\frac{1}{2}\pi s\right)}{s^3+s+s^2+1}$$

```
> invlaplace(%,s,t);
```

$$-\frac{1}{2}\,invlaplace\left(\frac{\coth\left(\frac{1}{2}\pi s\right)s}{s^2+1}, s, t\right) + \frac{1}{2}\,invlaplace\left(\frac{\coth\left(\frac{1}{2}\pi s\right)}{s^2+1}, s, t\right) + \frac{1}{4}\left(\mathrm{Dirac}(t)\,\mathbf{e}^{(-2\,t)} + (4 + (\cos(t) - \sin(t))\,\mathrm{Dirac}(t))\,\mathbf{e}^{(-t)}\right)y(0)$$

התמרת לפלס של פונקצית Dirac

```
> diff(Heaviside(x),x);
```

$$\mathrm{Dirac}(x)$$

```
> int(Dirac(t),t=-infinity..x);
```

$$\mathrm{Heaviside}(x)$$

```
> diff(Dirac(x),x);
```

$$\mathrm{Dirac}(1, x)$$

```
> laplace(Dirac(t-a),t,s);
```

$$\begin{cases} e^{(-s\,a)} & 0 \leq a \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

חומרים נוספים

- באתר e-learn של הקורס:
  - תקציר התאוריה
  - דוגמאות נוספות (מדרגות עולות אינסופיות, גלים בעלי צורות שונות כגון גל מרובע אינסופי וכו')
  - קישור לפרק בקורס ממוחשב המבוסס על Maple
- ב-help של Maple, ראו advisor
- טבלאות מעניינות:

http://www.vibrationdata.com/Laplace.htm

http://www.math.udel.edu/~rluke/teach/352/notes/LaplaceTable.pdf