

# SPIICE

## תוכנית מחשב לאנליזה של מעגלים חשמליים

מעגלים אלקטרוניים לינאריים (044142)  
אביב תשס"ה

OrCAD



## תכנון בעזרת מחשב (SPICE)

### מהי תוכנת SPICE?

תוכנת ה- SPICE היא כלי לסימולציה של מעגלים אלקטרוניים, ובפרט מעגלים שיש בהם רכיבי מוליכים למחצה. הסימולציה מתבצעת על-ידי חישובים דומים מאד (לעיתים זהים) לאלה שנלמדים בקורס, אך בניגוד לחישובים ידניים, התוכנה איננה מספקת ביטויים מתמטיים, אלא את הערכים המספריים בלבד.

התוכנה מסוגלת לבצע מגוון של סוגי סימולציה, מתוכם נבחר את הדרושות לצרכי הקורס:

- חישוב מתחים וזרמים במצב מתמיד במעגל עבור מקורות מתח קבועים או משתנים. חישוב נקודת העבודה (Bias Point) עבור מקורות DC קבועים תאפשר חישובי AC במעגלים לינאריים. נתעניין גם באופיין DC בין כניסה ליציאה של מעגלים מסויימים, ולשם כך נשתמש בסימולציה של סריקת מתחי DC (DC Sweep).
- חישוב תגובה זמנית (Transient) של המעגל לאותות זמניים בכניסה. סימולציה זו היא למעשה פתרון נומרי של המשוואות הדיפרציאליות שנגזרות מהמעגל, והיא תאפשר לראות את התנהגותם בזמן של מעגלי מיתוג כתוצאה משינויים בכניסה.
- חישוב תגובת התדר של מעגל לאותות סינוס בכניסה (AC). סימולציה זו מתבססת על מודל אות קטן של הרכיבים, והיא מתבצעת על-ידי חישוב פאזורי מספרי עבור מספר גדול של תדרים (AC Sweep).

### העתקת קבצי התוכנית להתקנה ביתית:

ניתן להוריד את התוכנה מאתר הבית של חברת CADENCE:

<http://www.orcad.com/download.orcaddemo.aspx>

### עבודה בחוות מחשבים PC/NT:

חבילת התוכנה ORCAD 10.0 נמצאת ב-


Start→All Programs→OrCAD 10 Demo→ Capture CIS Demo

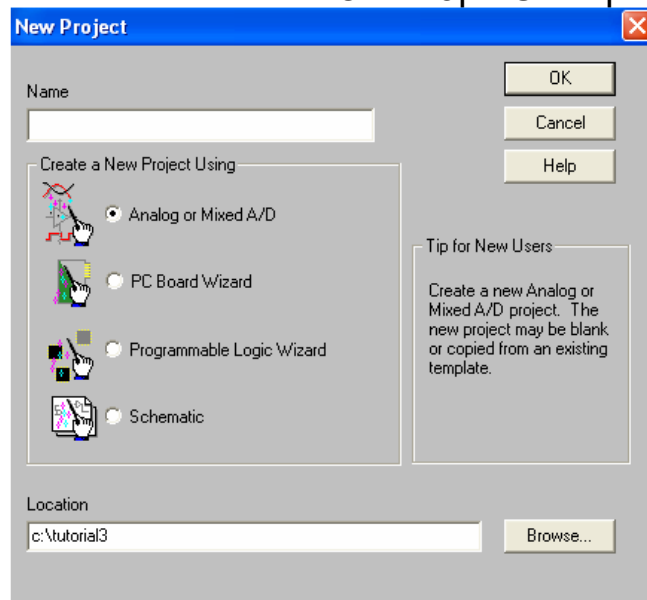
### הערה:

חבילת ה- SPICE היא גירסת הדגמה, evaluation version, ולכן קיימות מספר מגבלות, שנוגעות למספר הרכיבים והצמתים שניתן לשרטט ולבצע עליהם סימולציה (לדוגמא 10 טרנזיסטורים, ו-64 צמתים).

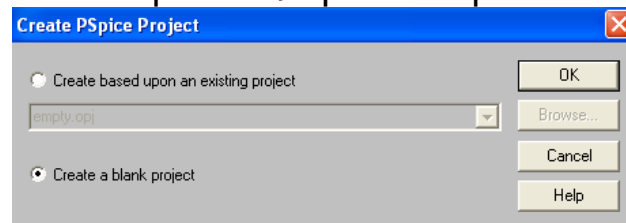
## שרטוט וסימולציה של מעגלים אלקטרוניים

### שרטוט המעגל

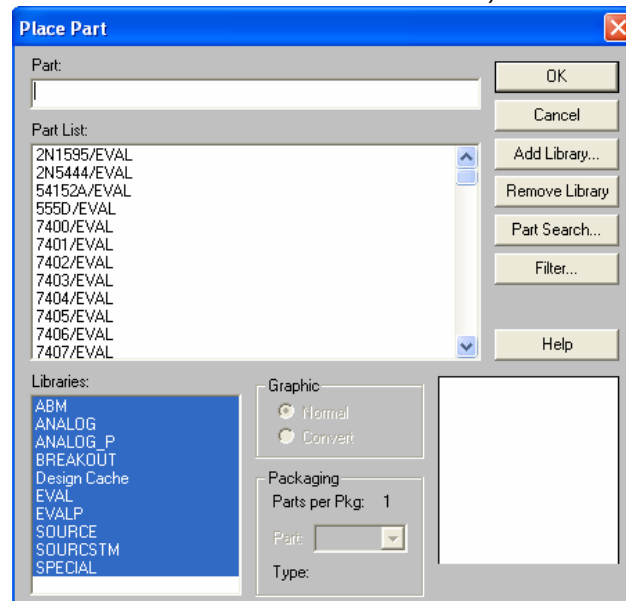
- הפעלת התוכנה מתוך:  
Start→All Programs→OrCAD 10 Demo→ Capture CIS Demo
- על מנת לפתוח קובץ חדש נלחץ על  ונפתח חלון הבא להגדרת שם הפרויקט ושם התיקיה לפרויקט החדש:



- לאחר הגדרת השם לפרויקט נפתח דף עריכה ריק:



- על מנת לשבץ רכיב חדש, יש לבחור Place→Part... מופיע חלון שנראה כך:



## פירוט הרכיבים המשמעותיים, הסימון שלהם ואופן קביעת תכונותיהם מופיעים ב"קטלוג הרכיבים".

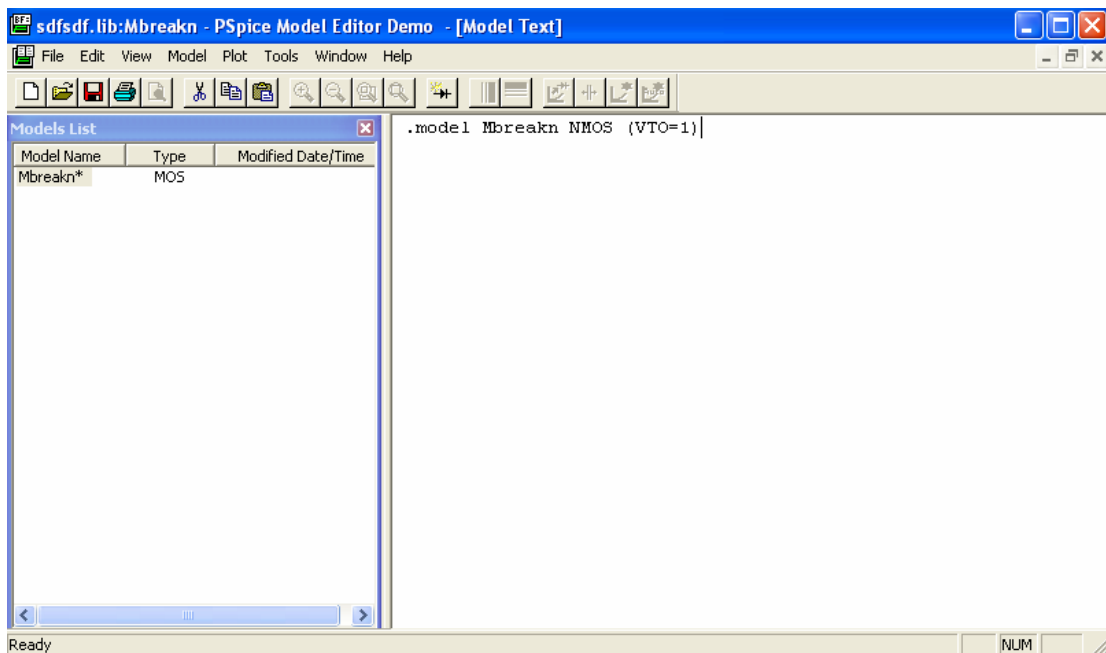
- עם שיבוץ הרכיבים הם מקבלים אוטומטית שם כלשהו. ניתן לשנות את השם על-ידי double-click על השם והזנת השם החדש.
- ניתן לטובב את הרכיבים ע"י בחירת: Edit→Rotate או Edit→Mirror.
- **הערה חשובה:** חייבים לשבץ רכיב 0/SOURCE במקום כלשהו במעגל. תוכנת SPICE מציגה מתחים יחסית לאדמה, ולכן חשוב לקבוע לנקודת הייחוס את מיקומה. (Place→Ground...).
- משיכת חוטים בין הרכיבים מתבצעת על-ידי בחירת Place→Wire או לחיצה על כפתור toolbar בצורת . אין ללחוץ על הכפתור שמתחתיו (בצורת ) שבו נראה הקו עבה יותר – זהו שרטוט bus ולא wire (bus מסמן קבוצת קווים).
- ניתן לתת לצמתים שמות בעלי משמעות על-ידי לחיצה על אחד החוטים השייכים לצומת, לחיצה על  והזנת השם הרצוי. למשל, ניתן לסמן את החוט הקשור ליציאת המעגל, ולקרוא לו out. השם הזה יהיה תקף בשרטוט גרפים. **מילת אזהרה:** אם יש שני חוטים בעלי אותו שם, הם **מקוצרים** זה לזה.
- ניתן להוסיף טקסט והסברים על הסכמה.
- על-מנת לשלב סכמה חשמלית במסמך של יישום אחר, מסמנים את האיזור הרצוי, בוחרים Edit→Copy, ועושים Paste ביישום השני.

### שינוי תכונות רכיבים

- לרכיבים ישנן ברירות מחדל (defaults) בכל הקשור להתנהגותם (התנגדות עבור נגדים, גודל המתח עבור מקורות מתח וכו'). מובן שנרצה לשנות חלק מאלה. אך ראשית נבחין בין תכונות (Attributes) של הרכיבים לפרמטרים של המודל:
- מאחורי כל רכיב מסתתר מודל, שלפיו נקבעת התנהגותו במצבים שונים. לדוגמא, המודל של הדיודה מכיל את משוואות הזרם כפונקציה של המתח ב-DC, את סכמת התמורה של הדיודה באות קטן, ומודל לקיבולים הפרזיטיים. כל המודלים מבוססים על פרמטרים, כגון זרם הזליגה בדיודה או מתח הסף ( $V_T$ ) בטרנזיסטור MOS, ולעיתים קיימים עשרות פרמטרים **לסוג** רכיב מסויים. בתפיסה של התוכנה, המשתמש שמעוניין לבצע סימולציה לא אמור להידרש לשנות פרמטרים אלה.
- לעומת זאת, קיימות תכונות של רכיבים שסביר מאד שהמשתמש ירצה לשנות: המתח של מקור מתח או ההתנגדות של נגד. תכונות אלו זמינות יותר וקלות יותר לשינוי.
- הדרך הפשוטה ביותר לשנות ערך של נגד או מתח של מקור מתח וכו' היא לבצע double-click על הערך שאותו רוצים לשנות ולהזין את הערך החדש.
  - כל הערכים נתונים ביחידות MKS. ניתן להשתמש בביטויים מהסוג של 1 pF לפי  $M=m=milli=10^{-3}$ ,  $u=micro=10^{-6}$ ,  $n=nano=10^{-9}$ ,  $p=pico=10^{-12}$ ,  $f=femto=10^{-15}$ ,  $T=tera=10^{12}$ ,  $G=giga=10^9$ ,  $meq=mega=10^6$ ,  $k=kilo=10^3$ .
  - ניתן גם לבצע שינוי על-ידי double-click על הרכיב עצמו. למשל, אם עושים double click על מקור AC (ולא על גודל המתח שלו) מופיע חלון כדוגמת:


	ACMAG	ACPHASE	Color	DC	Designator	Graphic	ID	Implementation	Implementation Path	Implementation Type	Location X-Coordinate	Location Y-Coordinate	H
1	SCHEMATIC1: PAGE1: V1	1Vac	Default	0Vdc	VAC.Normal	PSPICE Model	300	250	10				

בחלון זה ניתן כעת לקבוע לא רק את גודל מתח ה-AC, אלא גם פרמטרים נוספים כמו מתח ה-DC של הרכיב. אפשר גם לקבל את חלון הזה על-ידי סימון הרכיב ובחירת: Edit Properties... או ע"י לחיצה ימנית של העכבר ובחירת Edit Properties... • שינוי מודלים של הרכיבים (במסגרת הקורס: דיודות וטרנזיסטורים) תעשה ע"י סימון הרכיב ובחירת תפריט: Edit→PSPICE Model... או ע"י לחיצה ימנית של העכבר ובחירת: Edit PSPICE Model... יופיע החלון:



ראשית, רואים בחלון לעיל את שם המודל (Mbreakn) ואת סוג המודל (NMOS). בהמשך רואים שהוספנו  $V_{TO}=1$ , שגרם לשינוי מתח הסף ( $V_T$ ) מ-0V (ברירת המחדל של המודל Mbreakn) ל-1V. לעיתים קרובות יהיה חלון זה ריק בהתחלה, והוא יכיל רק את הפרמטרים שבחרים לשנות מברירת המחדל. פירוט מודלים ופרמטרים קיים "בקטלוג הרכיבים".



### חשוב !!!


רשימת הפרמטרים רושמים בסוגריים עגולות בהמשך לסוג המודל. כל הפרמטרים נרשמים בשורה אחת עם רווח ביניהם. יש לשמור את ההגדרות החדשות ע"י לחיצה על .

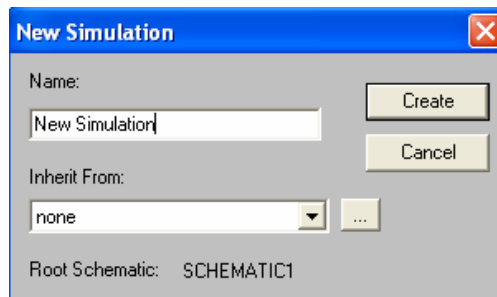
צריך לשים לב, שהשינויים מתקבלים רק עבור הרכיב הספציפי. אם רוצים מספר רכיבים עם אותם השינויים, יש לבצע שכפול של אותו רכיב באמצעות Copy-Paste, אך יש לשים לב שלאחר שכפול רכיב, שינוי בפרמטרים של אחד מהמשוכפלים יגרום לשינוי בכלם.

## לקראת סימולציה

לפני ביצוע הסימולציה, יש להגדיר את סוגי הסימולציה הרצויים. כמו-כן ניתן לסמן צמתים מסויימים כדי לקבל גרפים עליהם ביתר קלות.

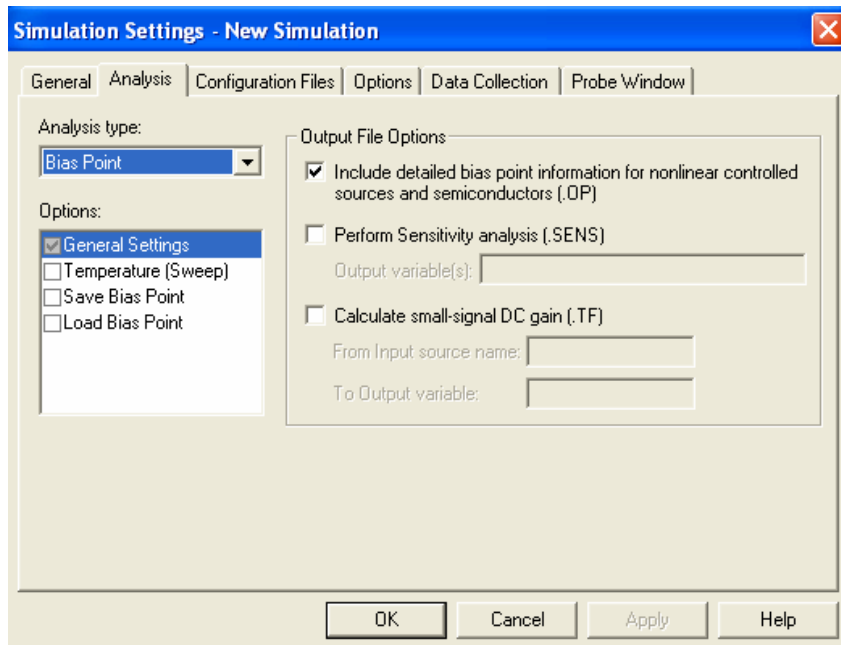
- סימון צמתים מתבצע על-ידי לחיצה על  לשרטוט המתח ו-  לשרטוט הזרם. לאחר הלחיצה על הכפתור מסמנים עם העכבר את הצומת שיש בו עניין. ניתן באופן שקול לבחור מתוך התפריט PSpice→Markers את סוג הסמן הרצוי. מודגש, כי זוהי רק דרך נוחה להציג באופן אוטומטי מתח או זרם מסויים, ואין זו הדרך היחידה (ראה פרק על הצגת תוצאות סימולציה).

- על-מנת לקבוע את סוגי הסימולציה לוחצים על  או PSpice→New Simulation Profile
- נפתח חלון:



בו נגדיר את שם הסימולציה.

- נפתח חלון חדש:

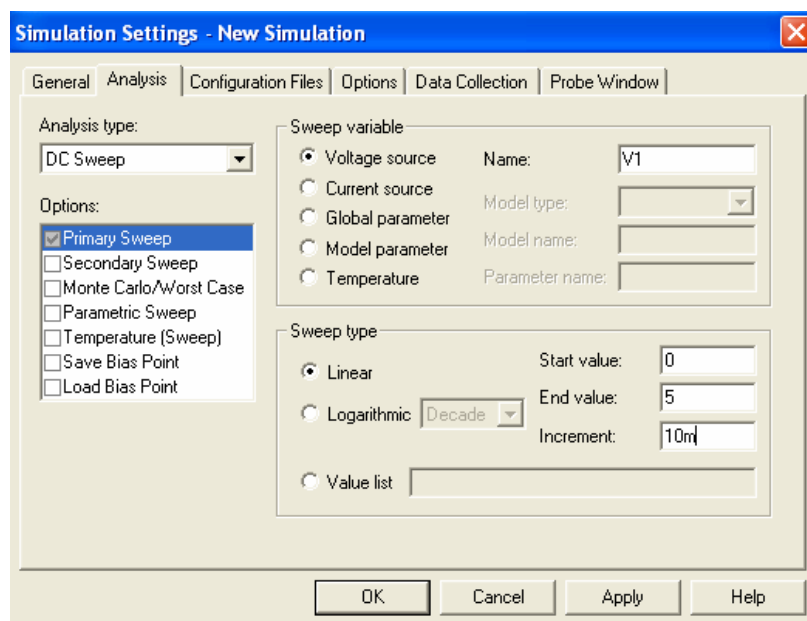


כאן מסומנים כל סוגי הסימולציה הרלוונטים לקורס: לטובת אופייני מתח-זרם ואופייני מעבר סטטיים של המעגל, מתוך Analysis type יש לסמן את DC Sweep. על מנת לקבל סימולציה של תופעות מעבר בציר הזמן, יש לסמן Transient. על-מנת לקבל סימולציה של תגובת התדר של המעגל יש לסמן את AC Sweep ו- Bias Point Detail.

סימולציה מסוג Parametric מאפשרת לקבל מספר גרפים בו-זמניים (על מערכת צירים אחת), כאשר כל גרף נגזר מסימולציה אחרת, תוך שינוי הפרמטר המסויים בין הסימולציות. לדוגמא, אפשר לבנות אופייני הטרנזיסטור עבור מתחי Vgs השונים. כעת נבחן את הנתונים שיש להזין עבור כל סוג סימולציה.

DC Sweep מאפשר לקבל אופיינים כתלות במתח, בזרם, או פרמטר של מודל של אחד הרכיבים או כמה מהם. חשוב לקבוע האם הסריקה תהיה לינארית או לוגריתמית (Decade ו-Octave הן סריקות לוגריתמיות).

בדוגמא בחרנו לבצע סריקה של מקור מתח V1 באופן לינארי ממתח 0V ועד 5V בצעדים של 10mV.



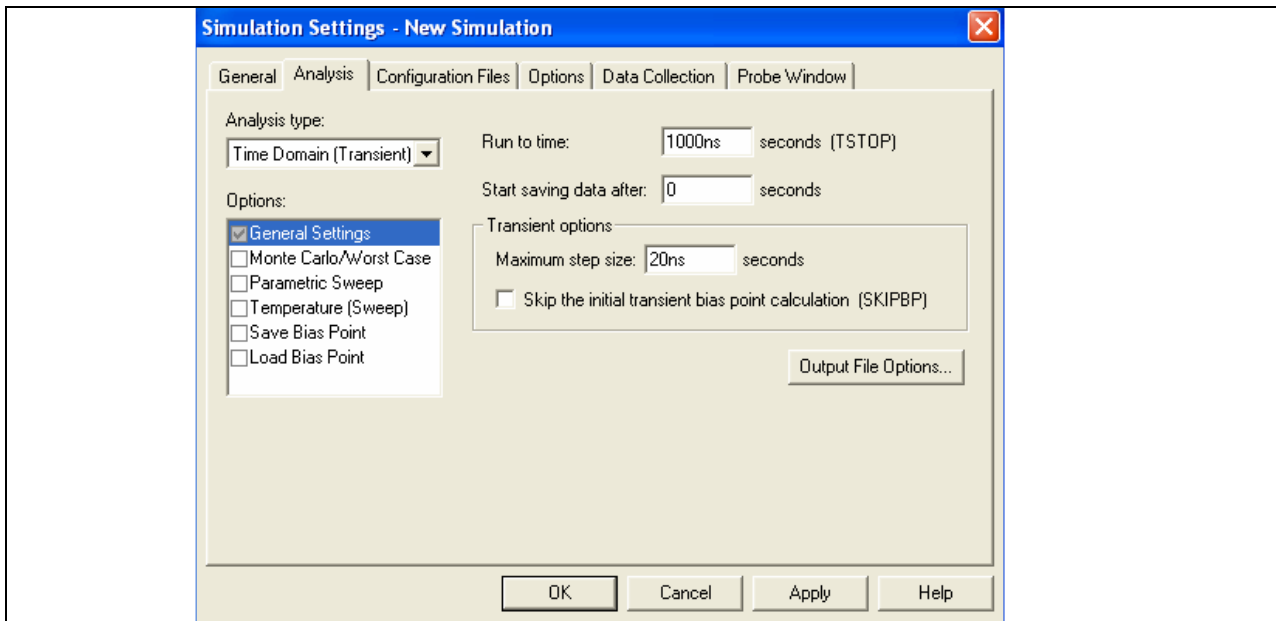
Transient היא סימולציה בציר הזמן.

חלון ה- Transient קובע את מרווחי הזמן בין נקודות הזמן המודפסות, אם מבקשים פרוט מודפס, (20ns בדוגמא) ועד איזה זמן יש לבצע את הסימולציה (1000ns בדוגמא).

ניתן גם לדלג בתצוגה על פרק זמן מסויים (Start saving data after)

ה- SPICE מבצע חישובים בצפיפות בציר הזמן כנדרש על-מנת לשמור על דיוק התוצאות. התצוגה הגרפית של מורכבת מנקודות אלה.

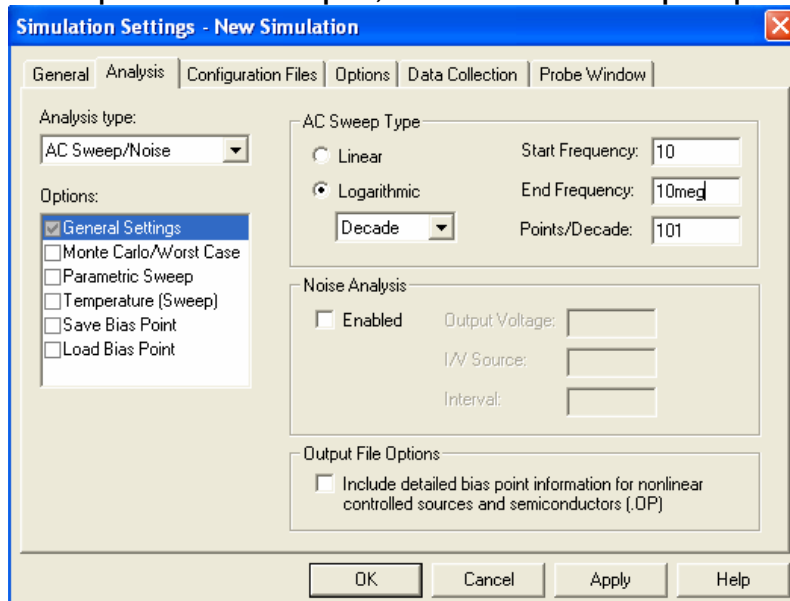
לעיתים ה- SPICE מסוגל להסתפק במעט נקודות דגימה בזמן, עד כדי כך שהתוצאה הגרפית נראית לא טוב. במקרה זה, ניתן לקבוע את צעד הזמן המקסימלי באמצעות Maximum step size, מה שיתן לגרפים צורה צפופה ויפה (על חשבון זמן חישוב).



AC SWEEP מתבצעת על-ידי המרת הרכיבים הלא לינאריים בסכמות לאות קטן.

בחלון AC Sweep נקבע בדרך-כלל סריקה לוגריתמית על-ידי בחירת Decade, על-מנת לקבל גרף שניתן להשוואה עם דיאגרמת בודה.

בדוגמא נבחרה סריקה בין 10 Hz ל- 10MHz, תוך חישוב 101 נקודות בכל דקאדה.

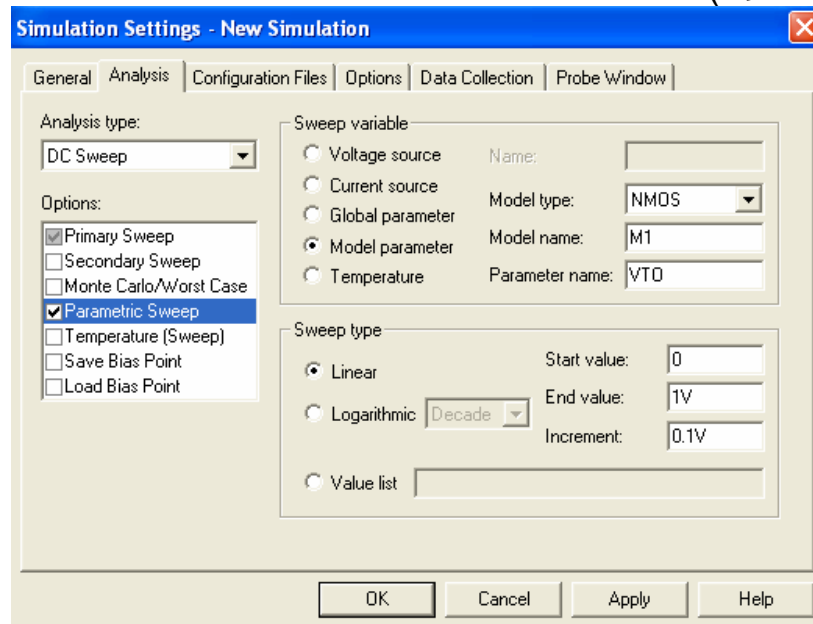


ה- Parametric הוא הדרך לחזרה על כל תהליך הסימולציה מספר פעמים, כל פעם עם ערך אחר במשתנה מסויים במעגל.

בחלון Parametric קובעים את אופן סריקת הפרמטר הרצוי. חלון זה דומה מאד לזה של DC Sweep, והוא פועל באותו אופן.

בדוגמא ממול בחרנו לבצע 11 סימולציות, עבור מתח הסף ( $V_T$ ) בין 0V ל- 1V.

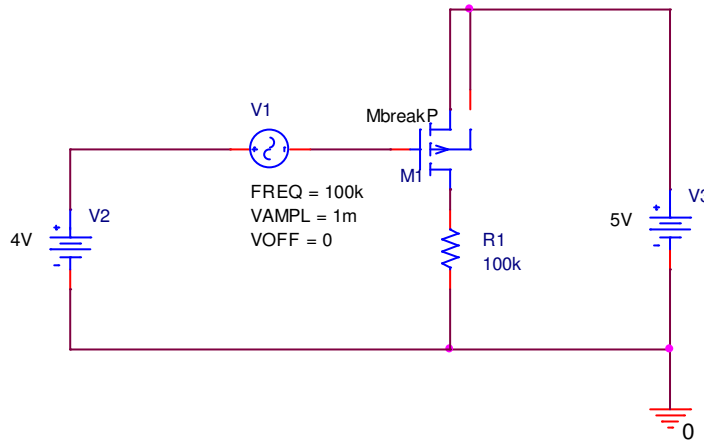
סוג המודל, שמו ושם הפרמטר תואמים את החלון שמופיע כאשר בוחרים את הרכיב הרצוי (ראה דוגמא לעיל)



- נוסף עוד, שקיימת סימולציה של Global Parameter ב- DC Sweep וב- Parametric: מגדירים משתנה באמצעות רכיב PARAM, ומשתמשים במשתנה באחד או יותר רכיבים במקום לקבוע ערך קבוע. למשל, ניתן להגדיר משתנה בשם X ולתת לנגד מסויים את הערך {X} (עם הסוגריים המסולסלים, ובמקום ערך קבוע כמו 1k). ניתן כעת לבצע סימולציה על X משתנה על-ידי בחירת "Global Parameter" בחלון המתאים.

## סימולציה

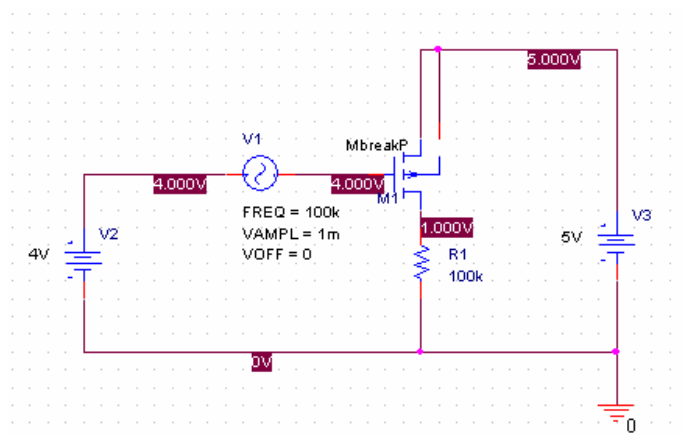
בהמשך נתייחס לדוגמא שלהלן.



### שימו לב!!!

לפני שמחברים טרנזיסטור PMOS נדרש לעשות לו Vertical Mirror ע"י לחיצה ימנית ובחירת אופציה המתאימה.

- הדרך הנוחה ביותר להפעלת הסימולציה היא לבחור Run → PSpice או ללחוץ על F11 או על כפתור toolbar בצורת . פעולה זו תגרום לשרשרת של הרצת תוכניות וייצור קבצים. אם אין שגיאות במעגל או בהגדרות הסימולציה, יופעל בסוף ממשק הגרפי.
- אחרי הסימולציה נוצר קובץ .dat. המכיל אינפורמציה לשירטוט של צורות גלים ע"י ממשק הגרפי וקובץ .out. המכיל אינפורמציה שימושית בפורמט טקסט (למשל פרמטרי מודלים של טרנזיסטורים, נקודת עבודה DC וכדומה).
- כמו-כן, אחרי הסימולציה ניתן לראות מתחים וזרמים ב- DC, (נקודת עבודה) כשהם מסומנים על המעגל. על-מנת להפעיל אופציה זו, יש לבחור PSpice → Bias points on Enable במידת הצורך, ולאחר מכן Enable Bias Voltage Display. או יותר פשוט: לוחצים ב- toolbar על כפתור ה- . בדוגמא נקבל:



- פעולה דומה ניתנת לביצוע עבור זרמי ה-DC.
- **שימו לב:** אם מבצעים סימולציה מסוג Parametric התצוגה של מתחים וזרמים מתאימה לפרמטרים האחרונים.

## קובץ out

- קובץ ה-out הוא מרכיב חשוב מאד בביצוע סימולציה נכונה. עיון בקובץ זה חושף פרטים משמעותיים מאד, שלא נראים בעבודה בממשק גרפי.
  - את קובץ ה-out ניתן לראות באמצעות כל מעבד תמלילים בסיסי (למשל Notepad) או מתוך ה-OrCAD ע"י בחירה: View Output File → PSpice (אחרי הרצת הסימולציה כמובן). בקובץ זה מוצאים כמה דברים חשובים, שאת חלקם נציג כקטעים מתוך הקובץ, לא בהכרח לפי סדר הופעתם.
1. לעיתים ישנן הודעות שגיהא מפורטות יותר ממה שמופיע על המסך.
  2. ישנו פירוט על פרמטרים כלליים של הסימולציה, כולל קבצי lib בשימוש:

\*Analysis directives:

.AC DEC 101 10 10meg

.TRAN 0 1000ns 0

\*Libraries:

\* Profile Libraries :

\* Local Libraries :

.LIB "..\..\new-pspicefiles/new.lib"

\* From [PSPICE NETLIST] section of C:\OrCAD\OrCAD\_10.0\_Demo\tools\PSpice\PSpice.ini file:

.lib "nom.lib"

3. כאן רואים את הפרמטרים של סוגי הסימולציה, ואת ספריית המודלים. כדאי לשים לב האם זו הספרייה שאנחנו חושבים שה-SPICE משתמש בה.
- המודל המדוייק של רכיבי המל"מ מפורט. ניתן למצוא את משמעות הפרמטרים הרלוונטים ב"קטלוג הרכיבים". מתוך הדוגמא:

```
MbreakP
PMOS
LEVEL 1
L 100.000000E-06
W 100.000000E-06
VTO 0
KP 20.000000E-06
GAMMA 0
PHI .6
LAMBDA 0
IS 10.000000E-15
JS 0
PB .8
PBSW .8
CJ 0
CJSW 0
CGSO 0
CGDO 0
CGBO 0
TOX 0
XJ 0
UCRIT 10.000000E+03 ...
```

4. ישנו פרוט מלא של נקודת העבודה, וצריכת הספק כוללת של המעגל. למשל, מתוך הדוגמא:

NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE

(N00319) 5.0000 (N00456) 4.0000 (N00476) 4.0000 (N00575) 1.0000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME CURRENT

V\_V1 0.000E+00

V\_V2 0.000E+00

V\_V3 -1.000E-05


TOTAL POWER DISSIPATION 5.00E-05 WATTS

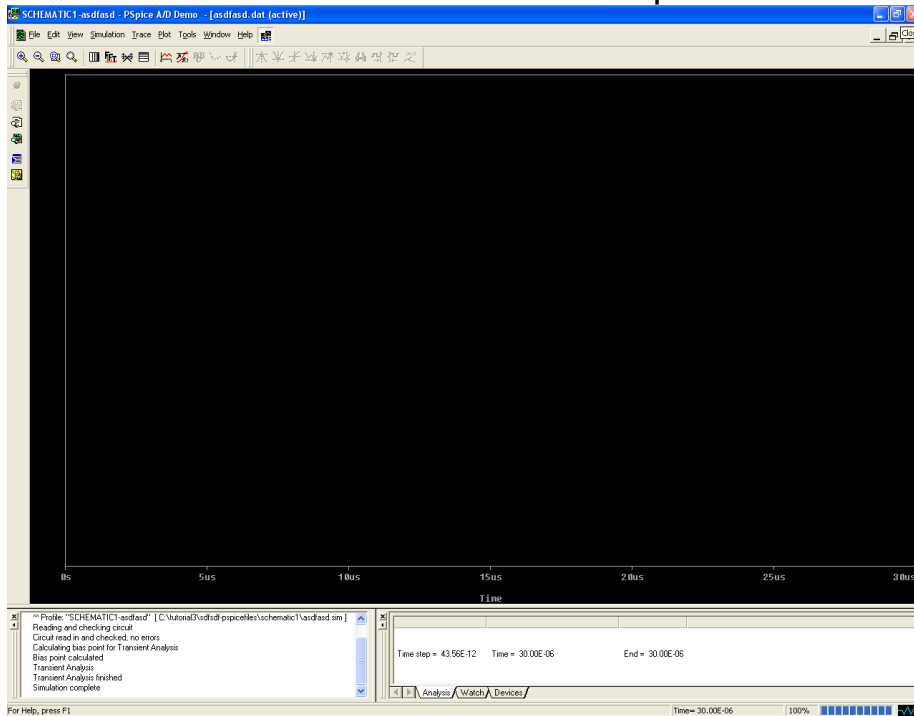
5. ישנו פירוט של הפרמטרים של הטרנזיסטור בנקודת ה-DC: נקודת העבודה עצמה, נתוני אות קטן ועוד. מהדוגמא:

\*\*\*\*MOSFETS

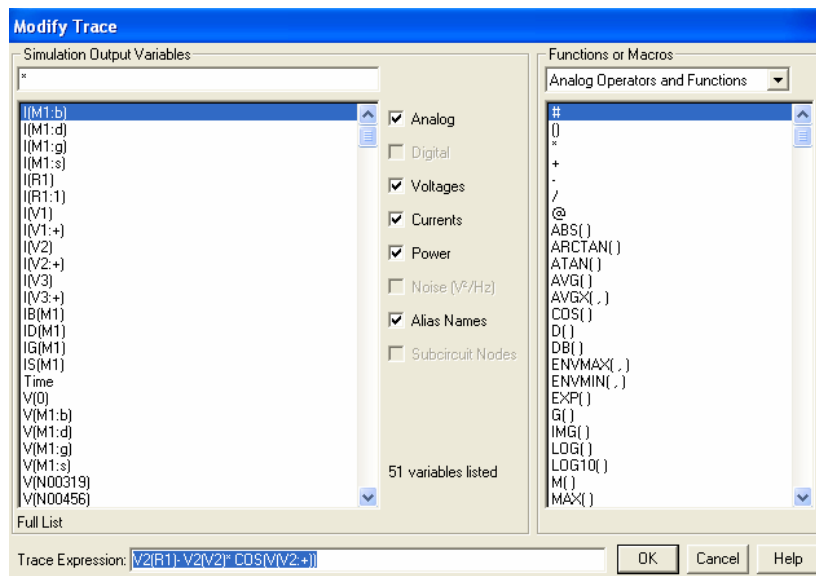
NAME M\_M1  
MODEL MbreakP  
**ID -1.00E-05**  
**VGS -1.00E+00**  
**VDS -4.00E+00**  
VBS 0.00E+00  
VTH 0.00E+00  
VDSAT -1.00E+00  
Lin0/Sat1 -1.00E+00  
if -1.00E+00  
ir -1.00E+00  
TAU -1.00E+00  
**GM 2.00E-05**  
GDS 0.00E+00  
GMB 0.00E+00  
CBD 0.00E+00  
CBS 0.00E+00  
CGSOV 0.00E+00  
CGDOV 0.00E+00  
CGBOV 0.00E+00  
CGS 0.00E+00  
CGD 0.00E+00  
CGB 0.00E+00

## הצגת תוצאות סימולציה בגרפים

1. על-מנת להציג גרפים יש להפעיל את הממשק הגרפי F12. ברוב המקרים, תוכנה זו תופעל אוטומטית בתום כל סימולציה. ניתן להפעיל את התוכנה בדרכים רבות, בין השאר בעזרת לחיצה על . ממשק הגרפי מתואר לעיל:

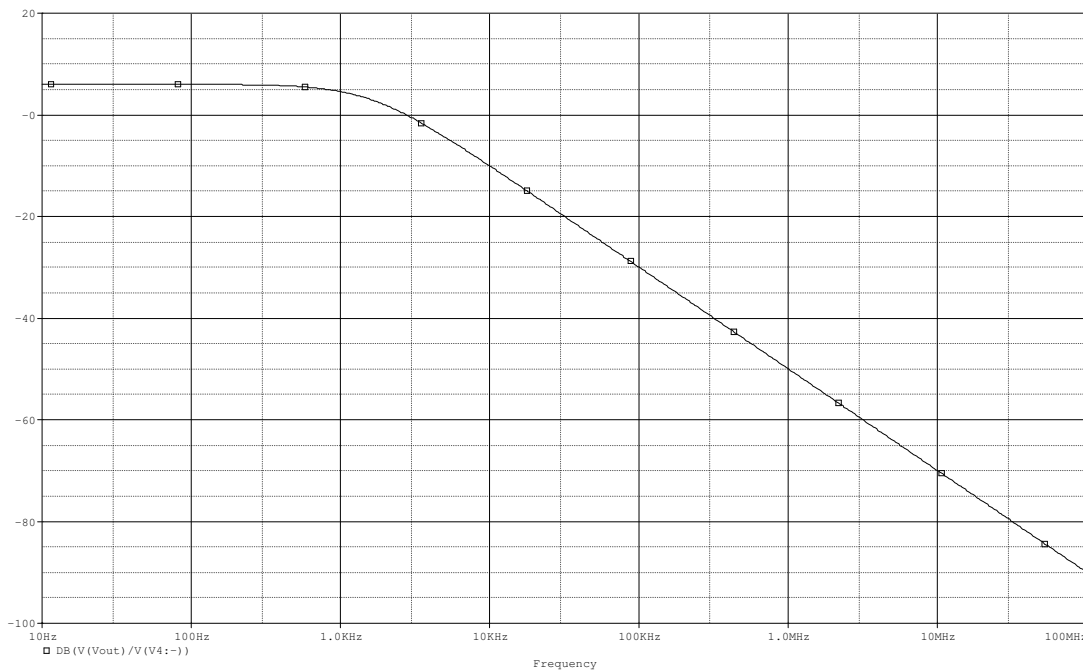


2. הוספת גרף: אם מעוניינים לקבל באופן קבוע תצוגה של מתח או זרם מסויים מייד עם עליית הממשק, ניתן לסמן צמתים (ראה "לקראת סימולציה" לעיל). אם מעוניינים לשרטט ביטויים של גדלים פיזיקליים או גרפים משתנים, משתמשים ב- **Trace** → **Add Trace**. מופיע חלון:

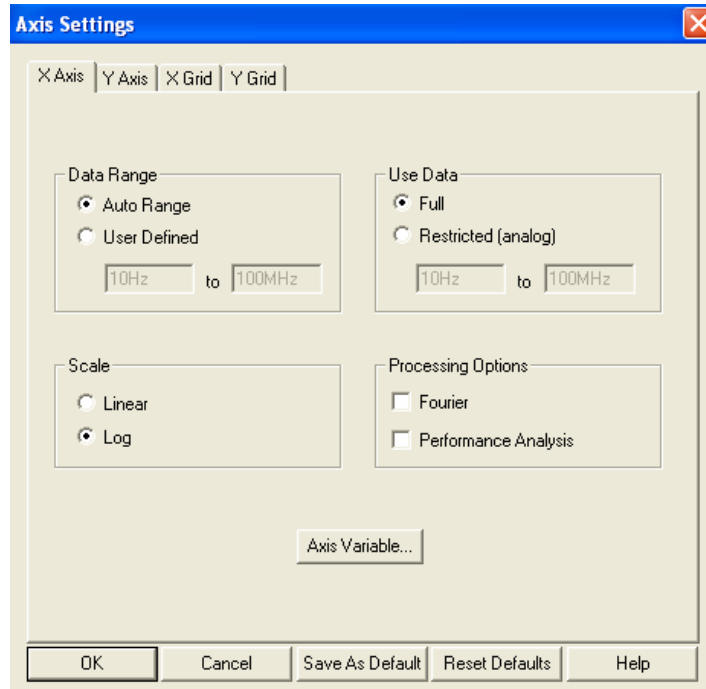


ניתן לבחור תצוגה של מתחים בודדים, וניתן גם לרשום ביטויים מתמטיים, כמו בדוגמא שבתחתית החלון. משמעות הגדלים שמתחילים ב-V היא מתח יחסית לאדמה. הגדלים שמתחילים ב-I מציינים זרמים. קיימים ביטויים רבים לכל גודל פיזיקלי במעגל, בגלל שכל מתח מופיע בתור המתח בהדקים של לפחות שני רכיבים וגם לפי הכינוי ב-Spice של הצומת.



תוצאת הבחירה לעיל (עבור סימולציה AC): V1 נלקח בחשבון כמי שמספק נקודת עבודה, אך אינו נכלל בתוצאות, ו-V2 מספק את אות הסינוס. הביטוי  $V(V1:+)/V(V1:-)$  מציינ **נקודה במעגל** ולא המתח של המקור V1. התוצאה של  $DB(V(out)/V(in))$  היא הגרף הבא:



3. ניתן להוסיף גרפים לאותו plot, על-ידי חזרה על `Trace→Add Trace`.
4. הורדת גרף מתבצעת על-ידי בחירת התאור של גרף (שנמצא סמוך לציר ה-x) עם העכבר ולחיצה על כפתור `Delete`.
5. ניתן לשנות את משתנה ציר x ואת התחום שמציגים את המשתנה על-ידי בחירת `Plot→X Axis Settings...`. שינוי המשתנה של ציר x למשתנה אחר או פונקציה של המשתנה מתבצע על-ידי לחיצה על כפתור `Axis Variable...` בחלון שנפתח:



ניתן גם לשנות בין ציר לינארי ללוגריתמי תחת "Scale".

6. ניתן להוסיף cursors על הגרף על ידי לחיצה על  או לבחור בתפריט Trace→Cursor→Display. מופעלים שני סמנים: האחד ניתן להזזה באמצעות מקשי החצים על לוח המקשים, ושני באותו אופן, תוך לחיצה על Shift. בחלון קטן מופיע מיקום הסמנים בציר x ובציר y, וההפרש ביו מיקומי שני הסמנים.
7. ניתן לבצע סימון קבוע על הגרף של הסמנים, תוך ציון מספרי של מיקום הנקודה על הגרף, על-ידי בחירת Plot→Label→Mark או .
8. אם יש יותר מגרף אחד על מערכת הצירים, ניתן לשייך cursor מסויים לגרף מסויים על ידי לחיצה עם העכבר על הסימנים בתחתית הגרף (ליד תאור מהו הגרף). יש ללחוץ עם הכפתור הימני או השמאלי של העכבר כדי לשייך את אחד משני הסמנים.
9. ניתן למקם סמן בנקודה מסויימת לפי ערך הגרף. בוחרים Trace→Cursor→Search Commands... למקם את הסמן בנקודה הימנית הקרובה ביותר למיקום הסמן הנוכחי, שבה ערך הגרף הוא 3.5 (ראה דוגמת Transient בהשר), מקישים `sf le(3.5)`. קיים תעוד נוסף על פקודות החיפוש במסכי העזרה של ה-Probe (תחת "Search Command").
10. תחת Plot→Label ניתן למצוא מגוון כלים פשוטים להוספת טקסט, חצים, עיגולים וכו'.
11. על-מנת לשלב גרפים במסמכים של יישומיים אחרים, בוחרים Window→Copy To Clipboard ועושים Paste ביישום השני.