**הטכניון - מ.ט.ל.** **הפקולטה להנדסת חשמל**

**המעבדה ל - VLSI**

# חוברת הדרכה על כלי CADENCE 6.1.8

**2022-23**

גואל סמואל, שרון בר-לב שפי, יוסי יולס

## תוכן עניינים

**התחברות ראשונית ממחשבי Windows-PC** ..... **Error! Bookmark not defined.**

**הגדרת סביבת עבודה למשתמש** ..... 2

**עבודה עם virtuoso** ..... 3

**סימולציות : הקדמה** ..... 8

בחלון Virtuoso Explorer, לחץ על Setup→Save Options ..... 9

**אנליזת נקודות עבודה DC** ..... 9

**אנליזת AC** ..... 9

**ביצוע אנליזת רעש** ..... 10

**סימולציה פרמטרית (parametric sweep)** ..... 10

**הצגת תוצאות סימולציה** ..... 12

**ה-Calculator** ..... 12

**ה-Results Browser** ..... 13

**הצגת גרפים על הסכמה :** ..... 16

**סימולציית Corners** ..... 17

**ביצוע אופטימיזציה באמצעות סימולציה פרמטרית** ..... 19

**סימולציית Monte Carlo** ..... 20

**ADE Assembler** ..... 23

**סימולציות קודמות- History** ..... 23

**שרטוט LAYOUT** ..... 24

**ביצוע LVS** ..... 27

**בדיקת LVS (Layout Vs. Schematic)** ..... 28

**יצירת Quantus – Extracted View** ..... 30

**הרצת סימולציה על ה-layout** ..... 31

**Spice Netlists imports using SpiceIn** ..... 31

**סימולציית hspiceD** ..... 33

# חוברת הדרכה על כלי - CADENCE 6.1.8
**2022-2023**

## התחברות ממחשבי Linux-PC
זאת הדרך המומלצת לעבודה. פשוט יש לבצע `login` לתחילת העבודה.

## הגדרת סביבת עבודה למשתמש
חוברת זאת מכילה הסבר קצר על איך להתחיל לעבוד עם כלי Cadence. ההסברים מיועדים למשתמשים המעוניינים לעשות Custom VLSI Design, כלומר תכנון ידני. החוברת מכילה את הפרקים הבאים:

1. מבוא
2. ציור סכמות
3. סימולציות אנלוגיות
4. ציור מסכות (layout)
5. הרצת DRC ו- LVS
6. הרצת סימולציה על ה- Layout

**עזרה**:
הפעל את הפקודה:

```
cdsnhelp
```

אם זאת הפעם הראשונה בנה ספריה חדשה בשם cadence למשל:

```
mkdir cadence
```

עבור לספריה חדשה :

```
cd cadence
```

הקפד לעשות תמיד לפני הפעלת הכלים.

**עבור טכנולוגיות TOWER 0.18u:**
העתק את קבצי האתחול:
יש לבקש מגואל הרשאות מתאימות לעבודה עם ספריית Tower, ללא הרשאות אלו לא ניתן להעתיק את הקבצים הבאים. לאחר מתן ההרשאות להתנתק ולבצע login מחדש.
יש להקפיד לרשום את הרווח והנקודה בסוף כל שורה:

וודא שקובץ ה- cshrc. שלך מכיל את השורות הבאות:

```
source /users/iit/cadence/source_cadence2223
setenv DRCTEMPDIR /tmp/drcusername
```

כאשר username הוא שם החשבון של המשתמש (בדר״כ epxxxx)
ניתן לערוך את הקובץ בעזרת הפקודה:

```
nedit ~/.cshrc &
```

שנה את הקובץ במידת הצורך, שמור את השינויים באמצעות ה-save וסגור את nedit מסודר באמצעות File→Exit . יש לבצע login מחדש על מנת שיחולו השינויים.

העתק את הקובץ הבא לספרית העבודה:

```
cp  /tools/kits/tower/TS18SL_6_07/KIT.cshrc .
```

פתח את הקובץ ושנה את השורה הבא

```
setenv PROJ_ROOT /users/user_name/cadence
```

כל ש- PROJ_ROOT יצביע על ספרית העבודה שלך. בצע את הפקודות הבאות:

```
source KIT.cshrc
echo `username` > user_list
```

כאשר username מהווה שם החשבון שלך.

makeProjectTree Project -flow T18C6DNSL1 -users user_list -cds -ver -assura -pvs

כאשר Project הוא שם (כלשהו) שיינתן לפרויקט.
**(אין לבצע את הפקודה makeProjectTree יותר מפעם אחת לפרויקט!)**

## עבודה עם virtuoso

### הפעלת הכלי

לאחר מכן, כל פעם שמפעילים את הכלי, יש לבצע את הפקודות הבאות :

```
cd cadence
source KIT.cshrc
cdsprj Project
virtuoso  &
```

**חשוב :** מסיבות שונות, יכול לקרות שתאים שמימשת הופכים להיות read only כלומר, לא ניתנים לעריכה. במקרים אלה, **לפני הפעלת virtuoso** יש לבצע :

```
clsAdminTool
are  .
exit
virtuoso
```

### ניהול ספריות

באמצעות Tools→Library Manager, ניתן להעתיק ולמחוק קבצים ולנהל ספריות. אין למחוק קבצים או ספריות שאינכם יודעים לשם מה הם משמשים. הפקודה makeProjectTree יוצרת ספרית עבודה בשם Prj_username. עליך לשמור את כל התכנון בספריה הזאת.

### יצירת ספריית עבודה

בסביבה מופיעות שתי ספריות עבודה : Project_username ו- Project_master. ניתן לשים את כל התכנון בספריות אלה. אבל אם ברצונך ליצר ספריה נוספת, ניתן לבצע זאת באופן הבא :

File -> new -> library

נפתח חלון, בשדה ה-name יש לרשום את שם הספרייה שבחרת לדוגמא project.

**עבור טכנולוגיות 0.18u TOWER:**

בחר באופציה "Attach to an existing technology library", לחץ על O.K. המאשר את היצירה של הספרייה חדשה ובחר ב- ts018_prim. לחץ O.K.

במידה ו-ts018_prim לא מופיע, המשתמש לא עודכן כראוי ויש לחזור על השלבים הקודמים של עדכון הקבצים.

**חשוב !!!** : יש לסגור את כל החלונות רק באמצעות פקודת ה- file→exit או פקודת ה- file→close window של האפליקציה. אין לסגור את החלון עם ה- exit (x) של החלון עצמו !

### שרטוט מעגלים

על מנת לבנות סכמה חדשה עליך ללחוץ על File->New->Cellview .

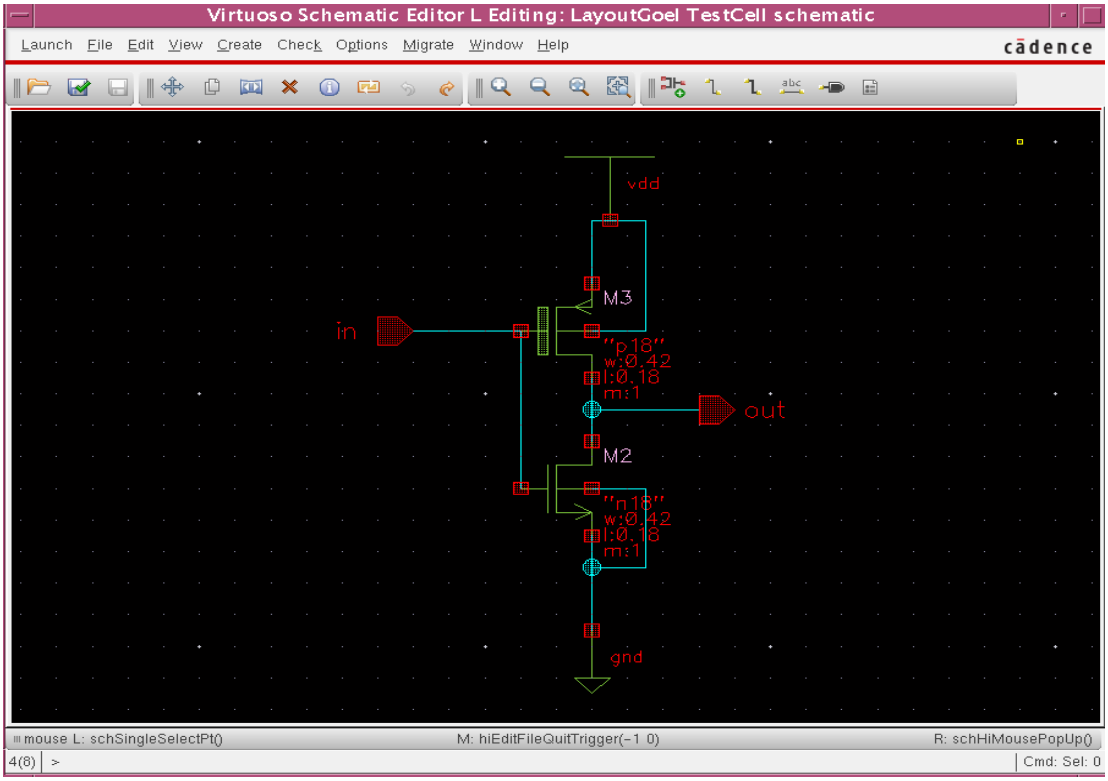
library : project

cell name : שם של התא החדש.

view name : schematic

Application : schematics-XL

יפתח חלון שבאמצעותו תוכל לצייר את המעגל שלך. יש ללחוץ על OK לאישור. בחלק זה נלמד לשרטט סכימה חשמלית של מעגל נתון בעזרת כלי schematic. עתה יופיע חלון חדש המיועד לשרטוט סכמות חשמליות:




Example of Schematic Window

בשלב הבא 'נצייר' את המעגל המכיל מספר אלמנטים.

בכדי להוסיף רכיבים חדשים למעגל, יש להשתמש בפקודה Create → Instance (או icon מתאים). בחלון שמתקבל לחץ על browser.

בחלון שנפתח בחר בספרית ts018_prim (עבור טרנזיסטורים ב- Tower 0.18) או ב- analogLib עבור מקורות ורכיבים אידיאליים. בתוך ספריות הנ"ל זו ניתן למצוא את כל הרכיבים הדרושים.

הרכיבים הרלוונטיים למעגל הם:

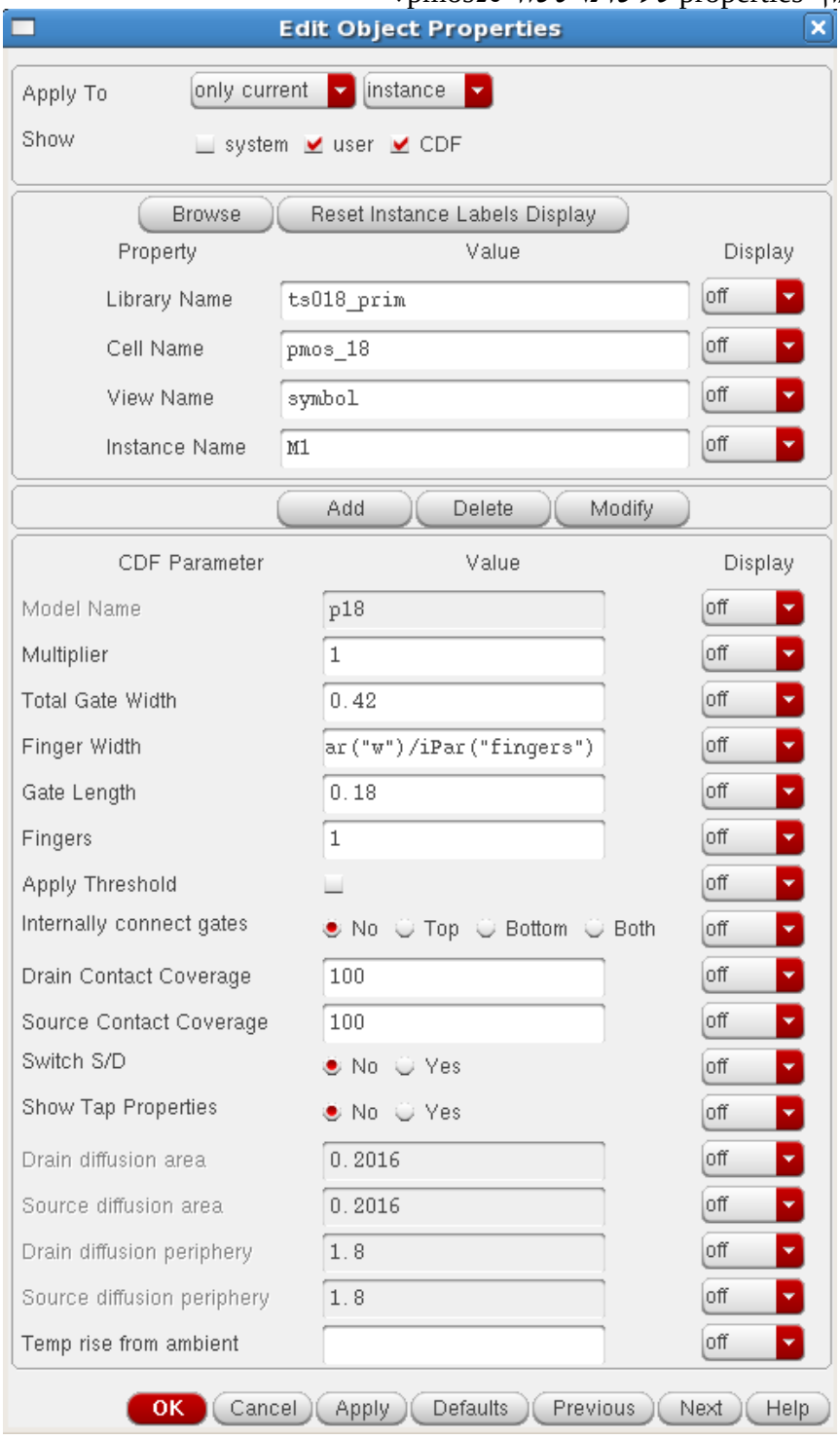
| | |
|---|---|
| טרנזיסטור pmos בעל 4 הדקי חיבור | pmos18 |
| טרנזיסטור nmos בעל 4 הדקי חיבור | nmos18 |
| מקור DC ל- Vdd ו- Vss | vdc |
| חיבור לאדמה | gnd |
| קבל | cap |
| מקור מתח חילופין | vsin |

- בחר ב- view מסוג symbol. לאחר הבחירה יש לעבור לחלון ה- schematics ולגרור את החלק למקום הרצוי, ובאורינטציה הרצויה (sideways , upside down , rotate), לחץ על F3 על מנת לקבל אפשרויות אלה.
- בעזרת הכפתור השמאלי ניתן למקם את הרכיב.
- בכדי לעבור לפקודה הבאה יש ללחוץ על Esc .

בכדי לחבר בין הרכיבים יש להשתמש בפקודה Create → Wire (או icon מתאים), לחיצה ראשונה על הכפתור השמאלי ממקמים את הנקודה הראשונה של הקו, יש 'לגרור' את הקו ללא לחיצה על כפתורי העכבר עד למקום הרצוי לסיום הקו. לחיצה כפולה על הכפתור השמאלי, תסיים את הקו.

לאחר שרטוט המעגל כולו יש לקבוע/לשנות את ערכי הפרמטרים של כל הרכיבים המשורטטים (ערכי המתחים, גדלי הטרנזיסטורים, וערך הקבל), בחר ב- object → properties → edit , סמן את האלמנט הרצוי ולחץ על הכפתור השמאלי.

דוגמא לחלון properties של טרנזיסטור pmos18:




Window of edit properties of pmos18

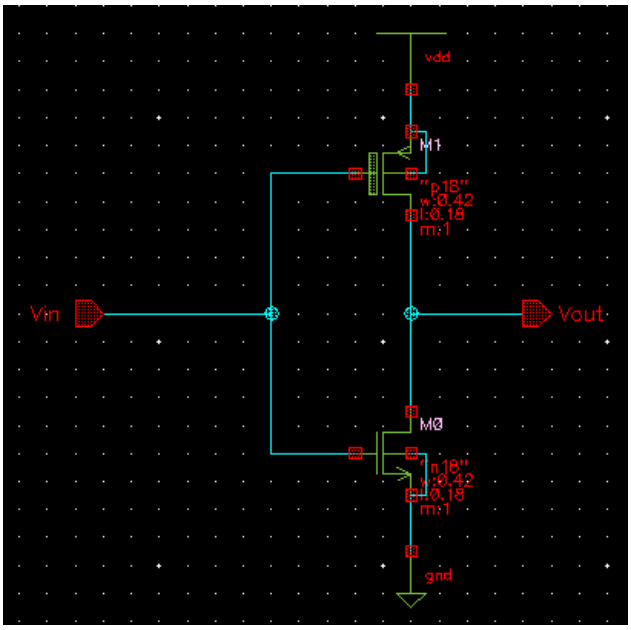
לאחר עדכון כל ערכי הרכיבים יש לבצע שמירה של המעגל ע"י File → check and save.

**הערה חשובה:** את הטרנזיסטורים יש למקם כך שהכיוון ה- source שלהם יהיה נכון! (הסימולטור אינו רואה את הטרנזיסטור כסימטרי).

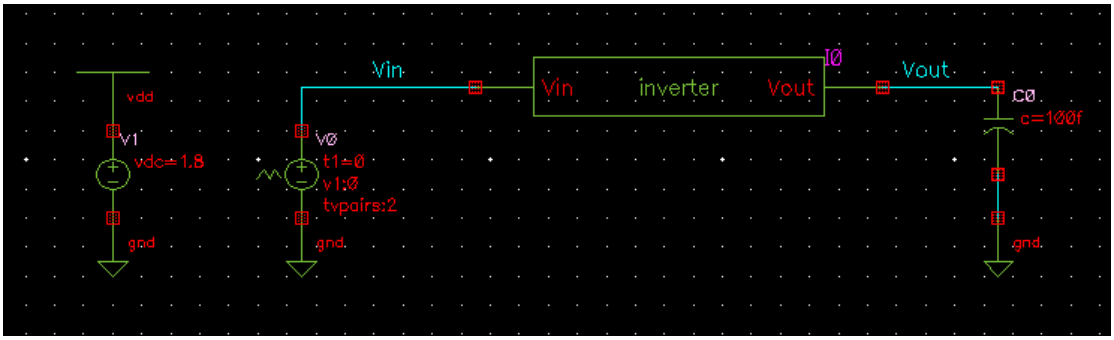
על הסכמה שלך להכיל רק את האלמנטים שבמעגל, כלומר טרנזיסטורים, נגדים, קבלים וחיבורים ל- vdd ול- gnd. יש להוסיף pin עבור כל כניסה ויציאה של המעגל. להוספת pin בחר ב- Create→Pin, בחלון שנפתח רשום שם ה- pin ואת סוגו (input,output) , בחר את כיוונו וסובב אותו במידת הצורך. הבא את הסמן למקום שבו אתה רוצה למקם את ה- pin ולחץ על כפתור העכבר. מקורות שדרושים בביצוע סימולציות נוסיף בהמשך.

כעת נבנה symbol למעגל, בנית symbol - כדי שאפשר יהיה להשתמש במעגל כתא בסכמה ברמת היררכיה גבוהה יותר. ניתן לעשות זאת בעזרת Create→Cellview→From Cellview. בחלון שנפתח לחץ O.K., מקם את הכניסות ואת היציאות על הצלעות הרצויות ולחץ על O.K. ניתן להוסיף labels לחוטים חשובים באמצעות Create→Wire name והצמדת שם משמעותי לחוט.

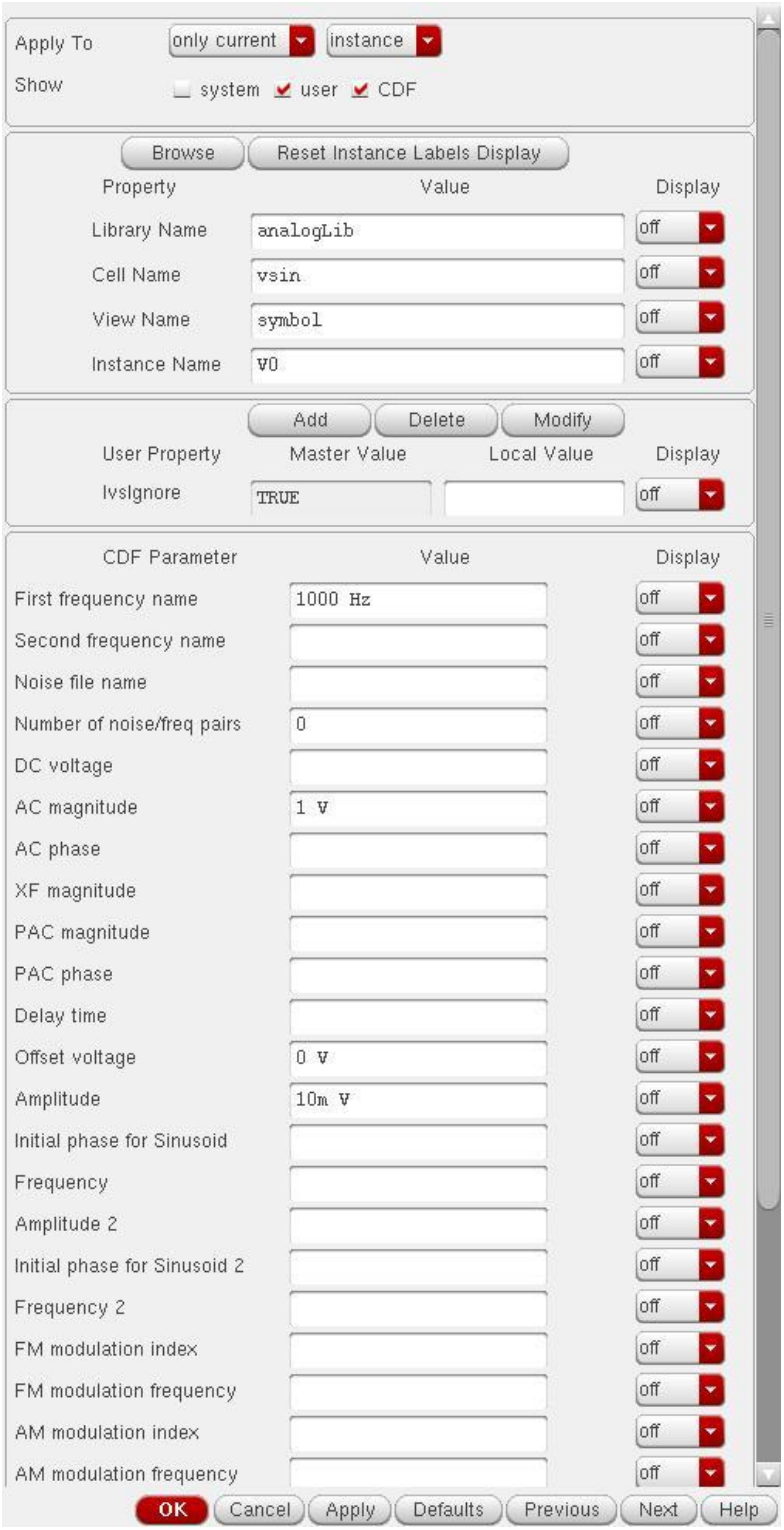
רצוי מאד להפריד בין האלמנטים של המעגל לאלמנטים שנחוצים להרצת הסימולציות. לכן, על מנת לסמלץ את המעגל שיצרת, בונים סכמה חדשה שמכילה את ה- symbol של המעגל שבנית ואת כל המקורות הנחוצים לסימולציה. חייב להופיע גם מקור בשם vdc שאליו מחוברים ה- symbols : vdd ו- gnd. בעזרת מקור זה קובעים את מתח ההספקה של המעגל.




Lower level Schematic with no sources




Higher level Simulated Circuit




Property form of sin source

## סימולציות : הקדמה

Cadence מספקת מספר תוכנות לסימולציות אנלוגיות: UltraSim, ams ו- spectre. לרב נשתמש ב- spectre. אפשר גם לבחור בתוכנת סימולציה hspice של חברת mentor. ניתן לבצע סוגי סימולציה רבים ובין יתר:

1. סימולציה בזמן - Transient.
2. סימולציה בתדר - AC.
3. סימולציית רעש (מבוצעת כמובן גם היא בתחום התדר).
4. סימולציית DC (שינוי מקור מתח כניסת ה-DC למעגל).
5. סימולציית parameter sweep
6. סימולציית Monte Carlo.
7. סימולציית Corners.

ב- Launch קיימים 5 ממשקים להפעלת הסימולציה. הישנים יותר: ADE L, ADE XL ו- ADE GXL והחדשים ADE Explorer ו- ADE Assembler. במסמך זה, אנו נתאר את החדשים בלבד. ADE Explorer הוא הפשוט יותר ומאפשר הגדרת של testbench אחד לכל תכנון, ADE Assembler מאפשר להגדרה של יותא מ- testbench אחד לכל תכנון. חשוב לציין שקיימות דרכים רבות לבצע את הפעולות השונות של סימולטור. לרוב, נתאר כאן רק אחת הדרכים.

### ADE Explorer

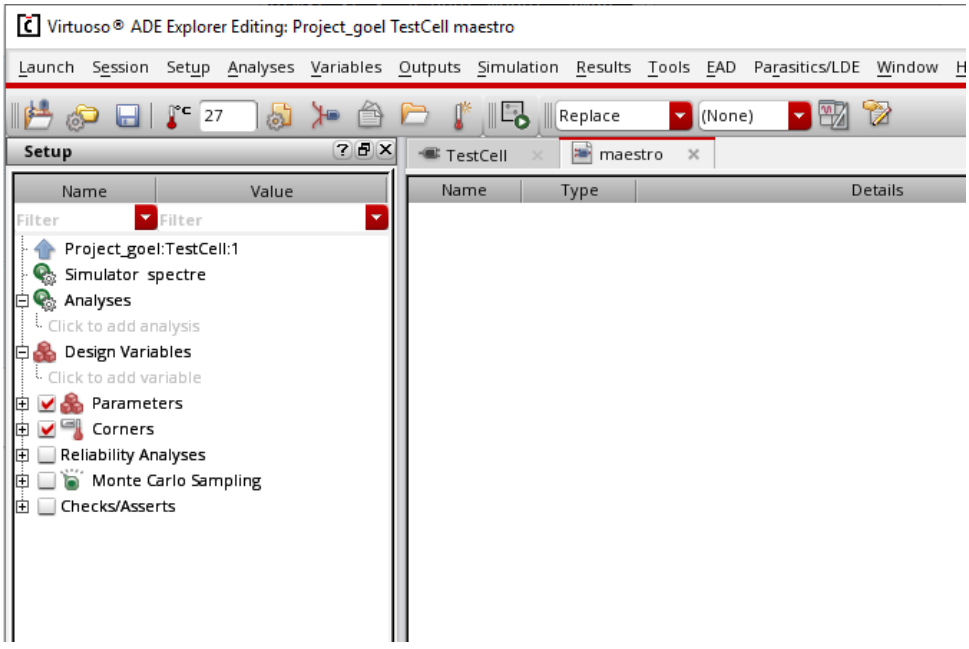
כדי לפתוח את הסימולטור יש לבצע את המהלך הבא:

Launch→ ADE Explorer

ובחר Create New View. לחץ על OK בחלון שנפתח.

יפתח tab חדש עבור ה- viewname בשם maestro של הכלי Virtuoso ADE Explorer:

לחיצה על שם התא (TestCell במקרה זה) יחזיר את הסכמה.




ADE Explorer

אם ה-view מסוג maestro כבר קיים, יש לבחור ב- Open Existing בפתיחת הסימולציה.

### שינוי הספרייה המכילה תוצאות סימולציות:

בחלון Virtuoso Explorer, לחץ על Setup→Save Options
ב- Results Location יש למלא את הספריות הרצויות למיקום הפלטים.

## אנליזת נקודות עבודה DC

בחר ב-: Analyses -> Choose. סמן את לחצני dc, Save DC Operating Point ו- Enabled.
לחץ OK. להפעלת הסימולציה לחץ על החץ הירוק שבצד ימין. ניתן לראות את תוצאות הסימולציה ה- dc על הסכמה. לחץ על ב- Results->Annotate ובחר ב- DC Node Voltages, DC Operating Points או DC Currents. לצפייה בלוג ריצה של הסימולציה יש ללחוץ על Simulation->Output Log.

## אנליזת AC

בחר ב-: Analyses → Choose. יש לבחור ב- AC ולמלא את תחום התדרים הרצוי לצורך הסימולציה:

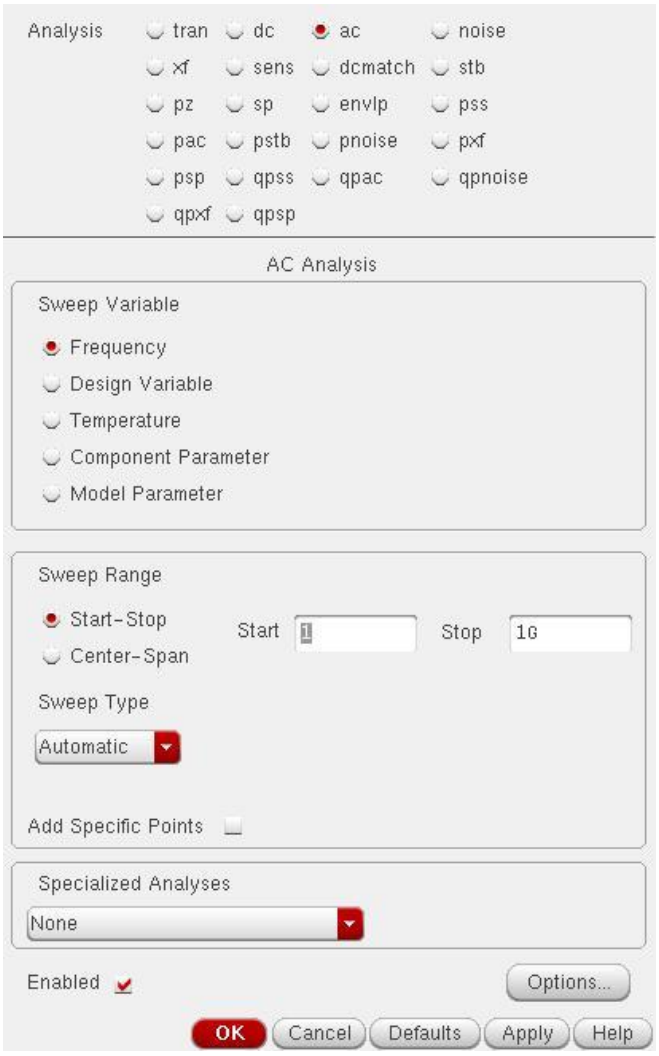



Fig 8 : Analysis Window for ac Analysis

לאחר מילוי הפרטים יש ללחוץ O.K לאישור. להפעלת הסימולציה לחץ על החץ הירוק שבצד ימין. (באופן דומה ניתן לבצע אנליזת Transient כאשר הפעם יש למלא את הערך התחתון והעליון של סקלת הזמן וכן את אינטרוול הזמן לדגימת התוצאה.)

## ביצוע אנליזת רעש

בחר ב- Analyses -> Choose : יש ללחוץ על noise. בחלון שנפתח יש להגדיר את תחום התדר בו מעוניינים לבצע את אנליזת הרעש. עבור Output Noise ו- Input Noise בחר ב- Voltage למשל.
יש לבחור את מקור המתח ע"י לחיצה על select ובחירת המקור על הסכמה. לאחר מכן יש לסמן את צומת היציאה ע"י לחיצה על select ובחירתו על הסכמה.

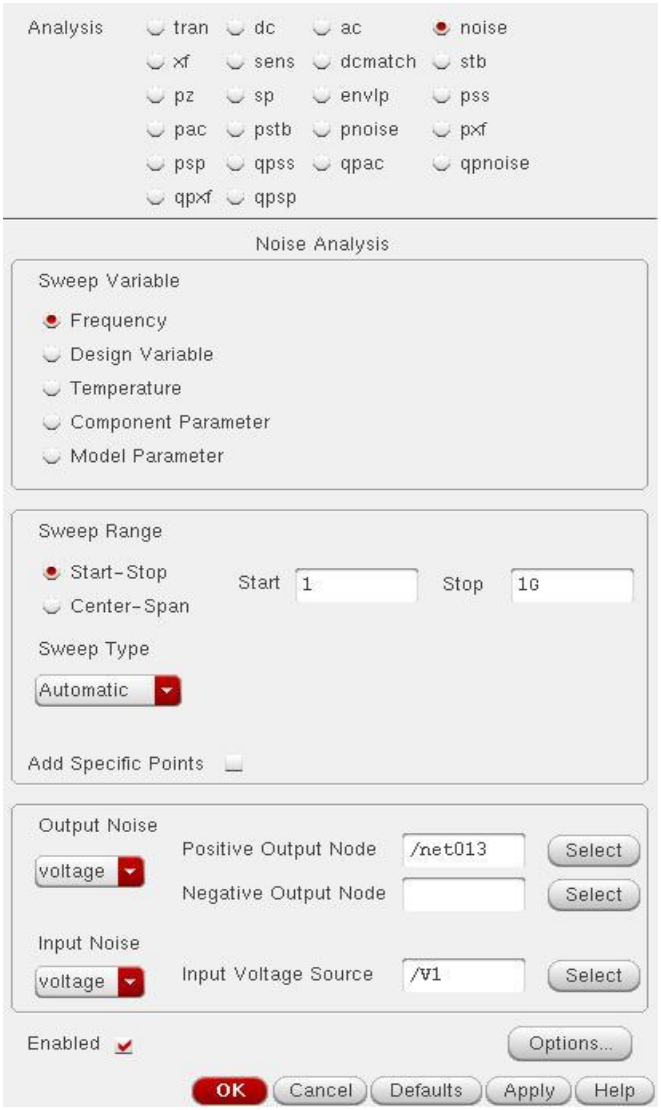



Fig 9 : Analysis Window for Noise Analysis

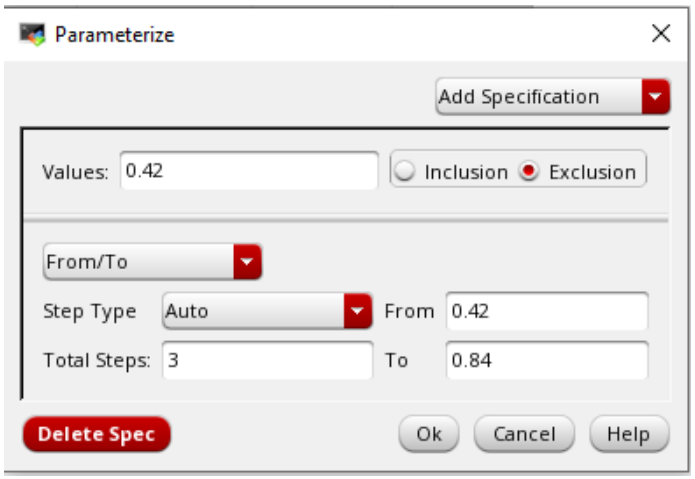
לאחר מילוי הפרטים יש ללחוץ O.K לאישור. להפעלת הסימולציה לחץ על החץ הירוק שבצד ימין.

## סימולציה פרמטרית (parametric sweep)

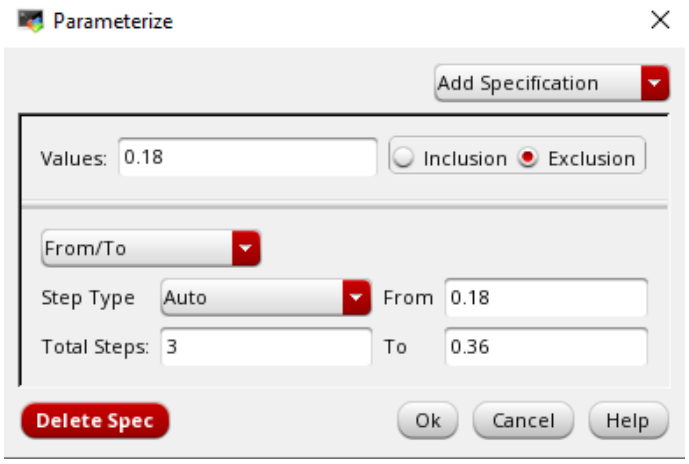
בסימולציה זו נקבע טווח ערכים עבור משתנים ונריץ עבורם סימולציה אחת במקום להריץ סימולציה נפרדת עבור כל ערך.
לדוגמא, נשנה את אורך טרנזיסטור ה-pmos ל- lp ורוחב ה-nmos ל- wp. (סימון הטרנזיסטור ולחיצה על הכפתור הימני ובחר ב- ה-properties). בצע Check and Save. במסך ה- ADE Explorer נתכנן סימולציית transient פשוטה. על מנת לייבא את המשתנים לסביבת ה- ADE יש לבצע Variables->Copy From Cellview :

ניתן לתת ערך default למשתנים בעזרת Variables->Edit. נגדיר ערך של 0.42ל- wn ו- 0.18 ל- lp :

בנוסף לכך, כאן נרצה לקבוע תחום ערכים לשני המשתנים. ראשית נגדיר תחום הערכים ל- wn מ- 0.42 עד 0.84 בקפיצות של 0.2. לחץ שתי לחיצות מהירות על 0.42 ולחץ על האליפסה עם שלש הנקודות. מלא את החלון שנפתח באופן הבא :




בצורה דומה נבצע עבור lp לפי האיור הבא :




להפעלת הסימולציה לחץ על החץ הירוק שבצד ימין. ניתן לראות שמתבצעות 3 X 3 = 9 ריצות. הרצת הסימולציה (לחיצה על החץ הירוק שבצד ימין) תריץ מספר איטרציות בהתאם למספר הערכים שנקבעו כאשר בחלון ה-results כל שורה תייצג ערך שונה

## הצגת תוצאות סימולציה

קיימות מספר דרכים להצגת התוצאות:

- לשונית ה-Output Setup ושימוש ב-Calculator
- ה-Result Browser

## ה-Calculator

כאן ניתן לבנות כל ביטוי שברצוננו להציג. ניתן להעתיק את הביטוי לחלון ה- Output Setup על ידי לחיצה על ">>" בשדה ה- Expression/Signal/File.

כעת נתאר כיצד לבנות ביטוי פשוטים בחלון ה- Calculator. אם חלון ה- Calculator עדיין סגור ניתן לפתוח אותו בחלון הסימולטור על ידי:

Tools → Calculator

יפתח החלון הבא לאחר לחיצה על :

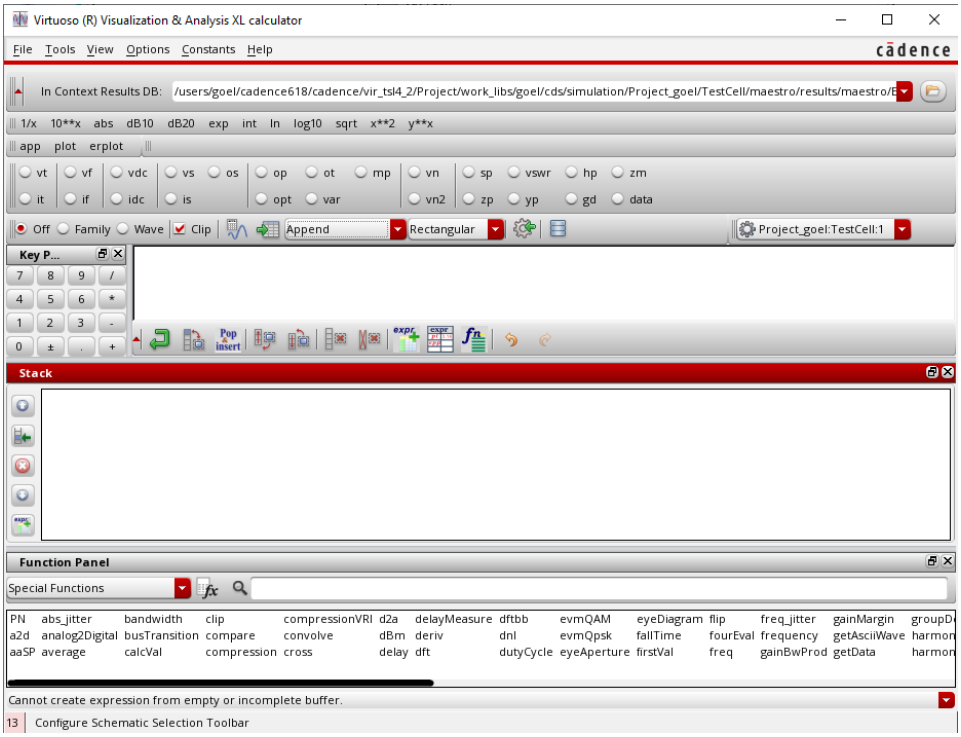
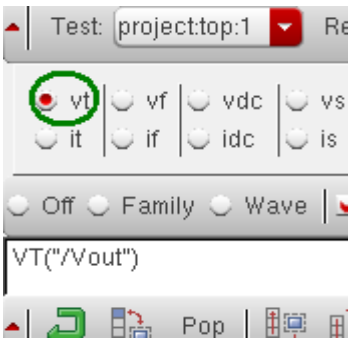



Fig 10 : Calculator Window

בחלק העליון של המסך ישנם כפתורי קיצור למשל כפתור vt, כפתור זה נועד ליצירת גרפים המתאימים לסימולציות transient (vf גרפים לסימולציות תדר וכו'). לחיצה על vt תקפיץ את חלון ה-schematic, סימון אחד החוטים ב-schematic יצור במחשבון את הביטוי למתח עבור חוט זה:




Vt button

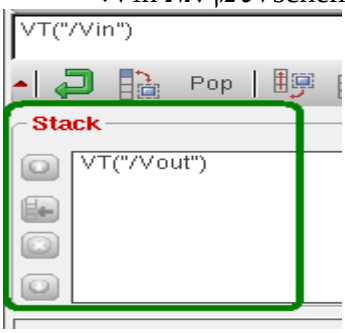
בתחתית המסך ישנה רשימה של פונקציות שימושיות שניתן להפעיל על המתחים או זרמים המוצגים.

**להצגת תוצאות אנליזת AC:**
בחר ב- vf עבור מתח או if עבור זרם, לאחר מכן את החוט (עבור מתח) או ההדק (עבור זרם) הרצוי ובחר mag או phase בהתאם לצורך, לבסוף לחץ על Plot→Tools.
כעת יפתח חלון waveform ליד הסכמה ובו הגרף המבוקש. כדי להפוך את חלון ה- waveform לחלון עצמאי יש ללחוץ על . לחיצה על מחזירה את החלון למיקומו הקודם.

(כדאי מאד להציג את הצירים בסקלה לוגריתמית בחלון ה- waveform יש ללחוץ על הציר של גרף עם העכבר ולבצע: axis → log , וכנ"ל עבור ציר y).

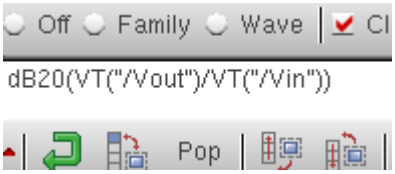
**להצגת תוצאות אנליזת Transient:**
בחר ב- vt עבור מתח או it עבור זרם, לאחר מכן את החוט (עבור מתח) או ההדק (עבור זרם) הרצוי ולבסוף לחץ על plot→Tools .

**ביטויי calculator מורכבים, שימוש בזיכרון המחשבון**
ניתן ליצור ביטויים יותר מורכבים על ידי שימוש בזיכרון המחשבון. לדוגמא נרצה למדוד את הגבר המעגל: במסך ה-calculator לחץ על כפתור vt, כעת כל חוט שתסמן יכנס ל-stack (זכרון של המחשבון). סמן את Vout ב-schematic וסמן את Vin.



The Calculator's Stack

לחץ על סימן חלקי "/" שמופיע בצד ימין למטה במחשבון, התקבל ביטוי של מתח המוצא חלקי מתח הכניסה. כעת בחלק התחתון של המסך באזור שבו מופיעות הפונקציות השימושיות, לחץ על הפונקציה dB20(). כעת גם dB20() התווסף לביטוי. הביטוי הסופי:




הוסף את הביטוי שיצרת ללשונית ה-Outputs Setup באמצעות לחיצה על ">" בשדה ה-Expression/Signal/File (וודא ששדה ה-Type הוא expr).

## Results Browser-ה

גם באמצעות ה-result browser ניתן לצפות בתוצאות. פתח בחלון ה-ADE Explorer הראשי את Tools → Results browser.

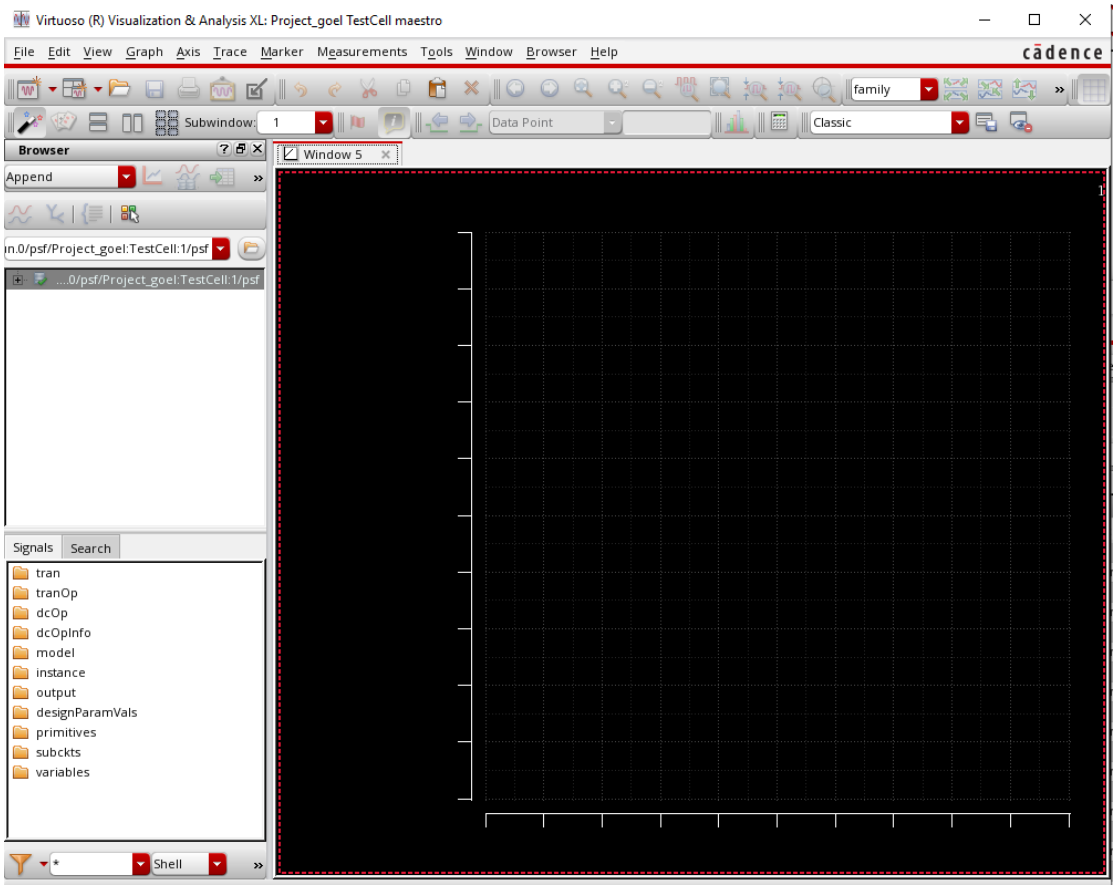



Fig 11 : Results browser Window

בצד שמאל למעלה של המסך תוכל לראות את הסימולציוה אותה ביצעת. בצד ימין תוכל לעיין בצמתים עבורם קיים גרף למשל עבור סימולציית transient שביצעת לחץ פעמיים מהר על tran בחלון שמאלי. כעת תוכל לראות את שמות הצמתים עבורם קיים גרף. בחר בסיגנל ולחץ על הכפתור הימני. בעזרת Plot Signal ניתן להדפיס את הגרף. אופציה מעניינת - ניתן להציג (Y axis vs Y axis) לדוגמא עבור סימולציית tran נציג את מתח המוצא כתלות במתח הכניסה ולא כתלות בזמן. סמן את Vout ולחץ על כפתור שנמצא בסרגל הכלים, כעת לחץ על Vin. מתקבל הגרף הרצוי.

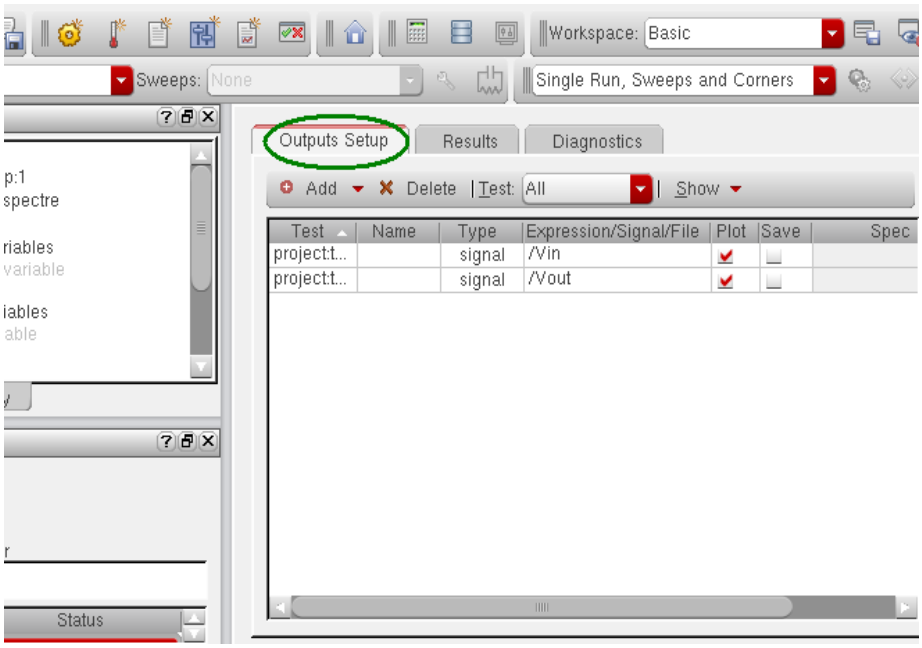
**להצגת תוצאות אנליזת רעש:**

פתח בחלון ה-ADE Explorer הראשי את Results browser → Tools. בחר ב- noise ובצע קליק כפול על שם של צומת. משמעות הגרף שתקבלו היא: מהו הרעש במוצא המגבר כאשר הוא מיוחס לכניסה. (כלומר הרעש ביציאה מחולק בפונקצית התמסורת של המגבר).

לחיצה על הכפתור הימני ובחירת calculator יעתיק את הביטוי ל- Calculator.

**לשונית ה-Output Setup**

לחץ על הלשונית Output Setup בחלון ה- Virtuoso ADE Explorer.

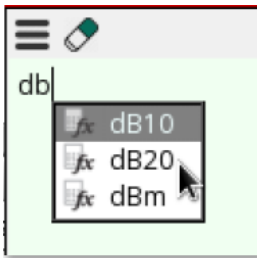



Outputs Setup Tab

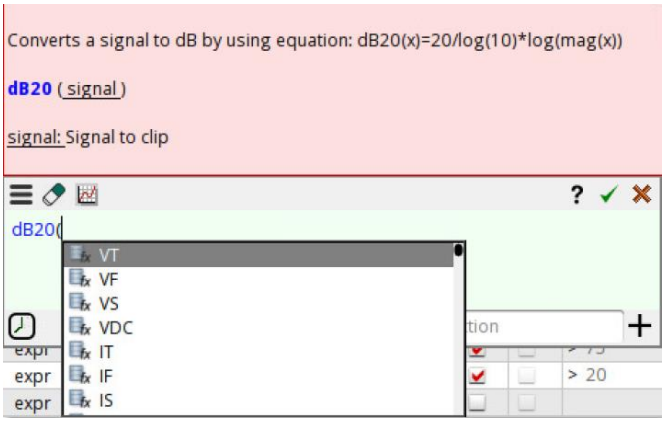
בחלון זה ניתן להוסיף סיגנלים וביטויים שברצוננו לשמור ולחשב. לחץ Outputs-Add להוספת פרמטר לצפייה. להצגת המתח של צומת בחר בעמודת type ב- signal. לחץ על השדה Details עד להופעת "...". לחיצה על "..." תגרום להופעת הסכמה. בחר ברשת (חוט) שברצונך להציג את הגרף עבורו, סמן וי בעמודת ה-plot לצפייה בגרף בסיום הריצה. הצגת זרם ניתן לעשות בצורה דומה אך יש לבחור הדק של התקן במקום חוט.

להצגת כל ביטוי אחר יש לבחור ב- expression במקום signal. הפעם לחיצה על השדה ה-Details תגרום להופעת . לחיצה על הסמן תפתח את החלון הבא :

בהתחלה החלון ריק. ניתן לבנות ביטוי ב- calculator ולהעתיק אותו לכאן בעזרת copy-paste או לבנות את הביטוי כאן בעזרת שדה ה- Locate Function. כאמור, יישמר כל המידע שמוגדר בחלון זה. לחלופין ניתן להתחיל בהקלדת db למשל. החלון הבא יופיע :




לאחר מכן יופיע החלון הבא :



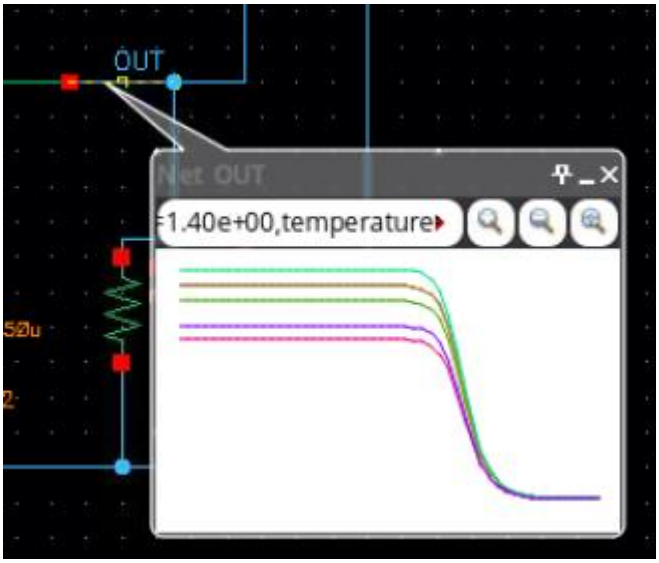

ובחירת VT ו- OUT ישלים את התהליך:

| | | |
|---|---|---|
| Gain1M | expr | dB20(VF("/OUT")) |

**הצגת גרפים על הסכמה:**

עבור לחלון הסכמה. לחץ על waveforms בתפריט הבא:

ברגע שהסמן נוגע בחוט בסכמה, ניתן יהיה לראות את צורת הגל:



## סימולציית Corners

Corner Analysis נועד לבדוק את תפקוד המעגל תחת תנאי עבודה שונים (מתח אספקה, טמפ'...) ומודלים שונים של הרכיבים הנוצרים בתהליך היצור. במהלך היצור של הרכיבים ישנה התפלגות באיכות הרכיבים והם מקוטלגים בקטגוריות כגון- מהירים, טיפוסיים, איטיים וכד', בקובץ המודלים מוגדרים "סטים" של מודלים/רכיבים מסוגים אלו.

**<u>הערה חשובה</u>** – בקובץ המודלים כאמור מוגדרים גם "סטים" של טרנזיסטורים מהירים ואיטיים. "סטים" אלו הם סוג של פינות מוכנות מראש וניתן להריץ עליהם סימולציות פשוטות (tran, dc) ללא צורך בהגדרת סימולציות corners מורכבות. כאשר נרצה לשלב פינות מכמה "סטים" נפרדים או בשילוב עם משתנים נוספים נבצע סימולציית corner מורכבת כפי שניתן לראות בדוגמא הבאה.

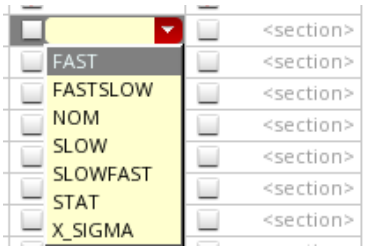
### דוגמא לסימולציית Corners

בדוגמא הזאת נבצע סימולציית Corners מורכבת על מעגל המהפך. נגדיר פינות עם טמפרטורה ומתח אספקה משתנים, נשנה את קבל המוצא לקבל שאינו אידיאלי מספריית tower. כמו כן נשלב בבדיקות טרנזיסטורים "מהירים", "טיפוסיים" ו-"איטיים".

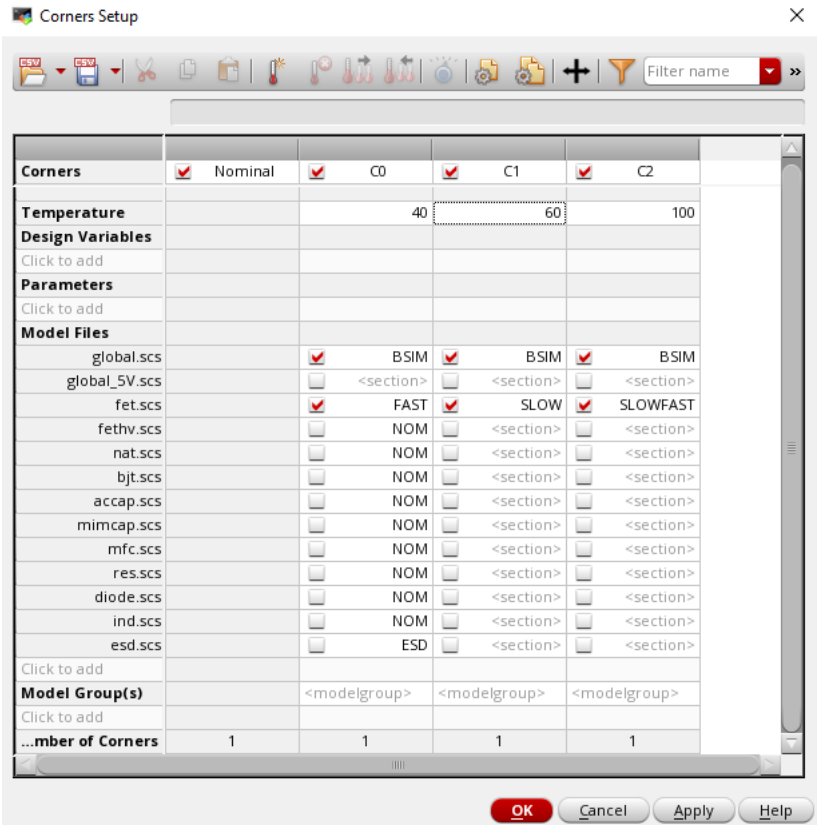
פתח את ה-schematic של המהפך. בחר ביציאות שיש להציג כפי שמוסבר ב- outputs setup בעמ' 13. הגדר לדוגמא סימולציה פשוטה tran. הרץ את הסימולציה וודא שאין שגיאות.

כעת נגדיר סימולציות ה- corners.

בצד שמאל של חלון ה- maestro לחץ על ה- + ליד Corners ולחץ על הכפתור הימני כשהסמן מעל Nominal. בחר ב- Add Corner. לחץ על הכפתור בשמאלי כשהסמן מתחת ל- Model Files. לחץ על Import From Tests בחלון שנפתח. לחץ על OK. להוספת פינה, לחץ על הכפתור הימני ובחר ב- Add Corner (Cntr N). שתי לחיצות מהירות על <section> בחירת מודל הרצוי עבור הטרנזיסטורים :

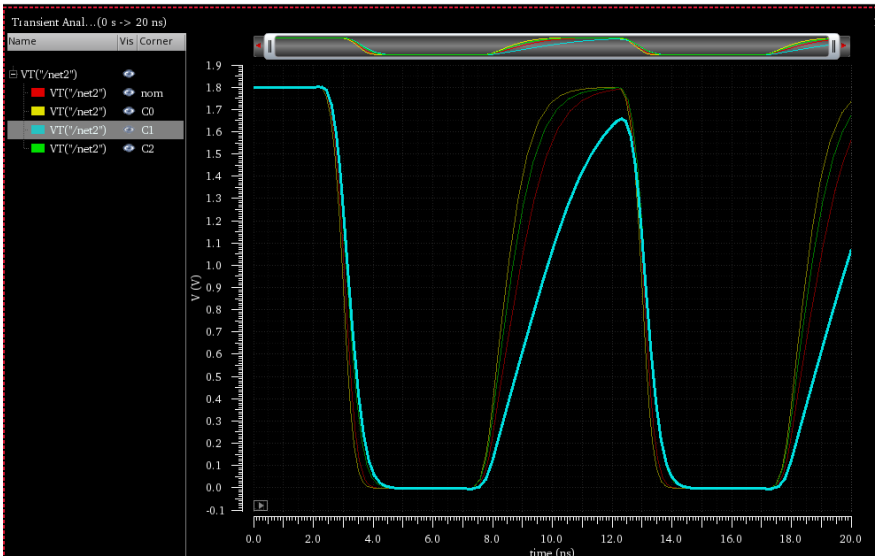



אפשר להגדיר טמפרטורה שונה לכל פינה. אפשר להגדיר את Vdd במשתנה ולתת לו ערך שונה בכל פינה. עליך להגדיר את כל השדות הרלוונטיים. לחץ על OK.




Corners view

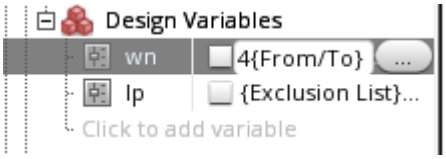
כעת ניתן לראות את הנתונים עבור כל סימולציה שתרוץ. אפשר להוסיף לפינות גם Variables ו-Parameters . לחץ O.K. **יש לוודא מסומן "וי" ליד המילה Corners בצד שמאל**. הרץ את הסימולציה ע"י לחיצה על החץ הירוק. את הגרפים (למשל של vout) תוכל לראות בלשונית ה-results.דוגמא לפלט- מתח המוצא של המהפך:



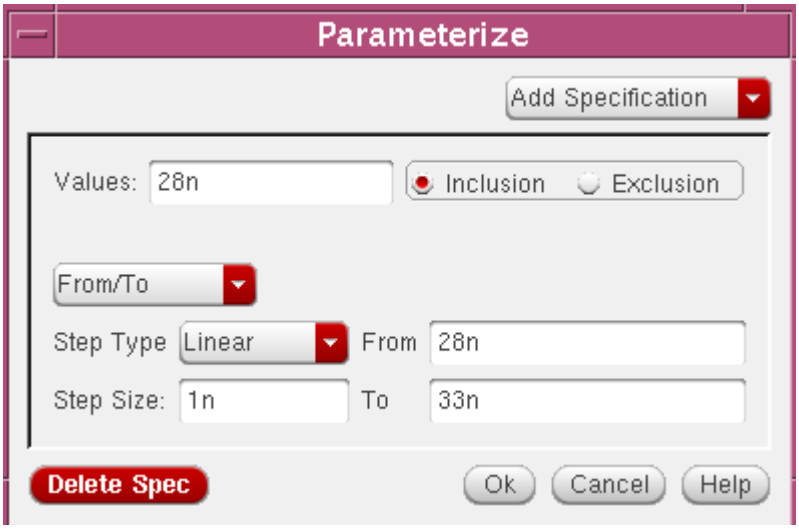

Vout vs time (Corners simulation)

אופציה מתקדמת- הוספת parameter sweep לסימולציית corner, דוגמא: במסך ה-schematic הגדר למקור המתח בכניסה למהפך משתנה בשם tt בשדות rise time ו- fall time. בחלון ה-

Global תחת Virtuoso Analog Design Environment XL Editing-ה של Data View הוסף את parameters ולחץ פעמיים על ערך ה-default שלו, לחץ על "…" שמופיע:




במסך שנפתח לחץ על ה-drop down menu למעלה ונבחר from/to. הגדר את תחום הערכים הרצוי עבור זמני עליה וירידה (ראה תמונה) ולחץ O.K. כעת יעודכן מספר ה-sweep points בחלון ה-Run summary. הרצת הסימולציה תריץ מכפלה של מספר הcorners במספר ה-sweeps כאשר בחלון ה-results כל שורה תייצג ערך sweep שונה, לכן יש לשים לב שמספר הריצות אינו גדול מדי.




Variable parameterize window

## Run Preview

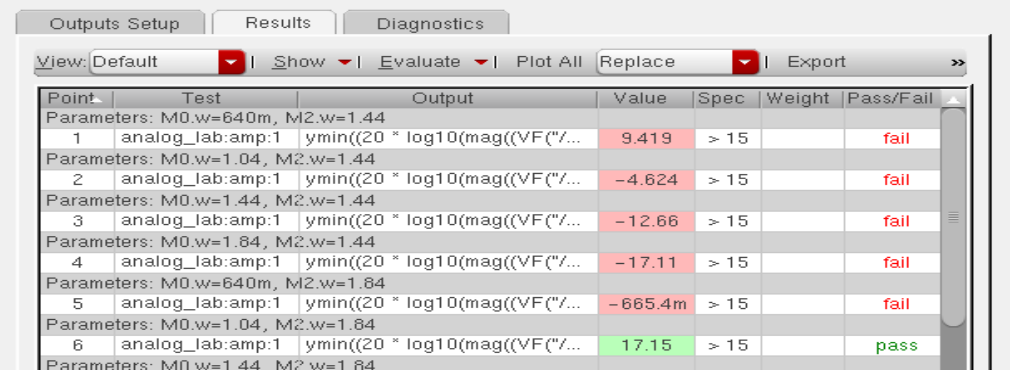
בעזרת **Simulation-Run Preview** ניתן לראות את כל הסימולציות שאמורות לרוץ בסימולציה הבא. לחיצת על ייתן פירוט לגבי הריצות.

## ביצוע אופטימיזציה באמצעות סימולציה פרמטרית

ניתן להגדיר תנאים אותם יבדוק הסימולטור במהלך הריצה. סימולציה מסוג זה היא בבסיסה סימולציה פרמטרית מאחר ונרצה לבדוק את התוצאות עבור מספר קונפיגורציות שונות ולבחור את הטובה מבניהן. לאחר הגדרת המשתנים או הפרמטרים עבורם יתבצע ה-sweep יש להגיר את התנאי או התנאים. הגדרת התנאים היא פשוטה ונעשית בלשונית ה-Outputs Setup של חלון ה-ADE Explorer, נוסיף את התנאי שנרצה לבדוק בשדה ה-Spec של הרשומה. בעת הרצת הסימולציות, הסימולטור יבדוק האם התנאי מתקיים ויודיע הודעה מתאימה עבור כל ריצה בלשונית ה-Results.

לשונית ה-Outputs Setup:

ניתן להגדיר Spec עבור expression (ולא עבור signal). ניתן לבנות את הביטוי ב- calculator ולהעתיק אותו לחלון ה- Outputs Setup.
לשונית ה-Results:




## סימולציית Monte Carlo

במהלך היצור, הפרמטרים של הרכיבים אינם זהים לחלוטין אלא מתפלגים לפי התפלגות סטטיסטית כלשהי. בדרך כלל מריצים סימולציות עם ערך אחד מסוים עבור כל פרמטר כפי שהוגדר בקובץ המודלים. לעיתים יש להריץ סימולציות כאשר הפרמטרים השונים מקבלים ערכים אקראיים. סימולציות Monte Carlo נועדו לאנליזה סטטיסטית של התנהגות המעגל על ידי הרצת מספר רב של סימולציות תוך כדי בחירה אקראית של פרמטרי המודל בהתאם לפילוג הסטטיסטי שלהם.

**הרצת הסימולציה:**

ראשית הרץ סימולציית נקודות עבודה DC כפי שהוסבר לעיל. הוסף סימולציות נוספות כרצונך (ac, transient...), הוסף את הביטויים עבורם תרצה לראות פלטים בלשונית ה-output setup כפי שהוסבר לעיל. וודא שהריצות מסתיימות בהצלחה.

בחלון ADE Explorer (maestro tab) בחר באופציה: Monte Carlo Sampling

לחץ על Click to Open Setup Form לפתיחת תפריט monte carlo. לחץ על Advanced – Show All Options.

הסבר על האופציות השונות בתפריט:

Method:

Process – בחירת אופציה זו תיצור מודל סטטיסטי לכל תהליך.

Mismatch – בחירת אופציה זו תיצור מודל סטטיסטי עבור כל instance.

All- שילוב של Process ו-Mismatch.

Sampling method

סמן random לריצה רגילה.

סימון Latin hypercube יכול לחסוך מספר ריצות.

Other options

Run nominal Simulation – מאפשר ריצת מבחן לבדיקה האם המעגל תקין, חוסך ריצות מיותרות במקרה של שגיאה.

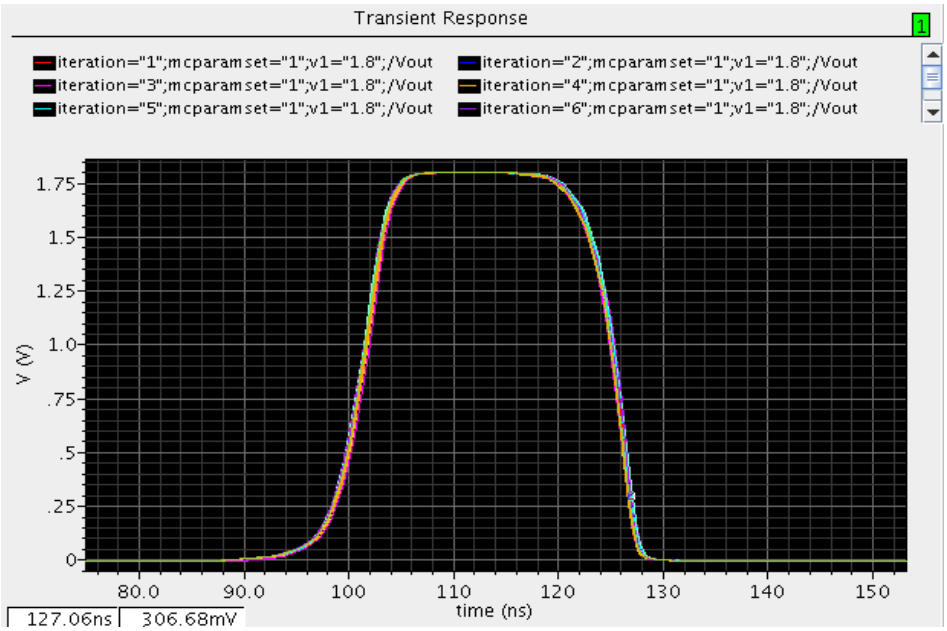
Save Waveforms- חיוני להדליק אופציה זאת כדי לאפשר שמירת נתוני כל הריצות, אופציה זו צורכת מקום רב בדיסק ולכן יש להסיר ריצות ישנות.
Seed – הזנת seed תיצור את אותם התנאים בכל סט סימולציות והתוצאות יהיו זהות כל פעם. השארת שדה זה ריק תגרום ליצירת נתונים רנדומאליים עבור כל סט סימולציות monte carlo
First Point- מגדיר את מספר הריצה התחלתית.

Number of points- מגדיר את מספר הסימולציות שירוצו.

דוגמא לסימולציה, בתפריט Monte carlo בחר:

Method: all
Number of points : 20
Sampling method: random
Other options: Save Waveforms (Simulation Data).

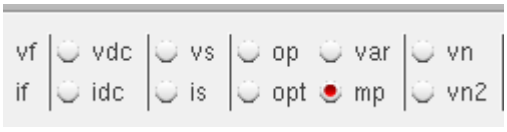
לחץ OK. להפעלת הסימולציה לחץ על החץ הירוק שבצד ימין.
דוגמא לפלט סימולציית monte carlo:




**צפייה בפרמטרים הסטטיסטיים:**
בלשונית ה-results נוכל לבחון את הנתונים הסטטיסטיים:

- נבדוק מהי ההתפלגות של הפרמטרים הרלוונטיים לאוסף הריצות במעגל זה המופיעים בקובצי המודלים. בלשונית ה-results בחר ב- test ולחץ לחצן ימני על שם הטסט ובחר ב- histogram (נסה גם Scatter Plot).
- בעמודה של value סמן את אחד הריצות ולחץ מקש ימני. במקום Outputs בחר statistical parameters. תוכל לראות את הערכים עבור ריצה זו.
- לדוגמא vtnlvmatch הוא פרמטר שמשפיע גם על מתח הסף הכללי-vt של כל טרנזיסטור. בחר בפרמט זה ולחץ על plot. באופן דומה ניתן להציג את histogram של כל יתר הפרמטרים.

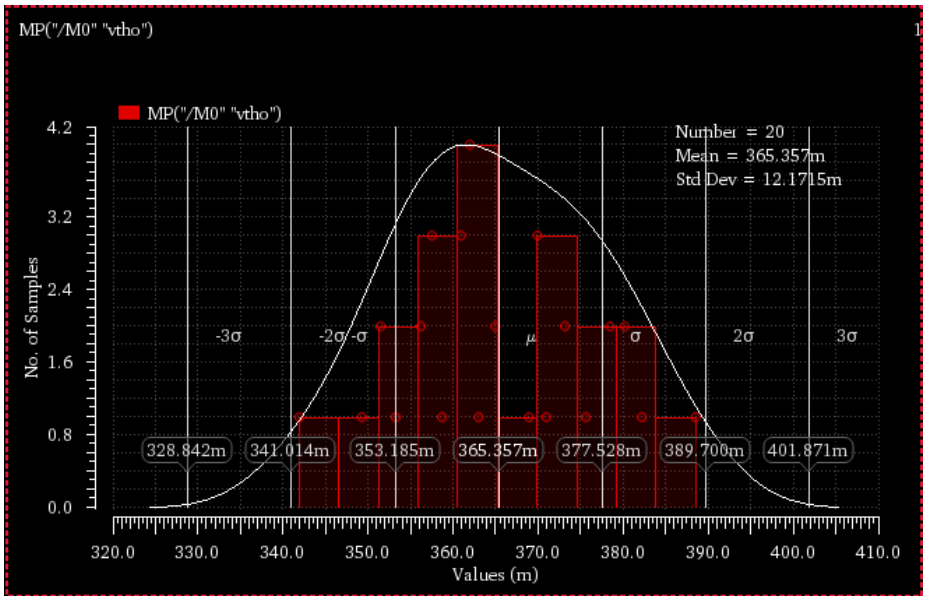
נוכל לראות גם כיצד vt מתפלג - במסך ה-calculator לחץ על כפתור mp (model parameter)




לחיצה על כפתור זה תחזיר את מסך ה-schematic ותפתח חלון קטן:

סמן את טרנזיסטור ה- nmos למשל, בחלון הקטן לחץ על ה-drop down menu ובחר את הפרמטר vth0, ה-vt של הטרנזיסטור. לחץ O.K.

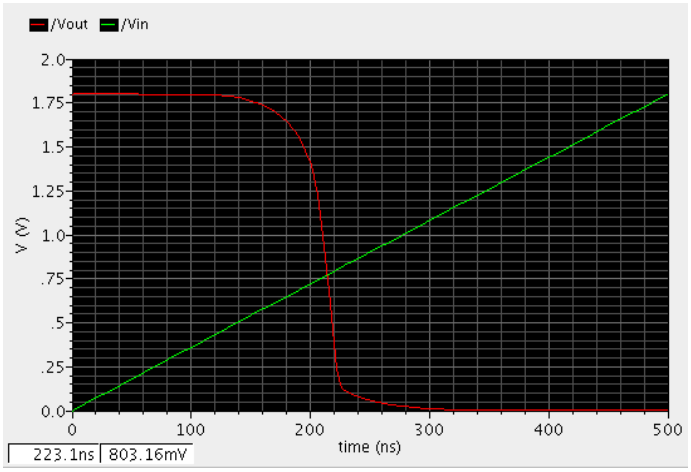
דרך נוספת להצגת התוצאות : בלשונית Outputs Setup הוסף שורה מסוג expr ולחץ על עמודה של Details פעמים. לחץ על הסמן . העתק לחלון שמופיע את הביטוי מה- calculator לדוגמא MP("/M0","vtho") . הרץ את האנליזה. הפלט המתקבל כעת :




התקבל גרף היסטוגרמה עבור vt, ניתן לראות בראש הגרף נתונים סטטיסטיים רלוונטיים.

## הגדרת קובץ קלט לסימולציה

לעתים יש צורך בהזנת פלט של סימולציה אחת כקלט לסימולציה אחרת. ניתן להגדיר קובץ קלט לסימולציה, היתרון בקובץ מסוג זה הוא עבור קלטים מורכבים שקשה לתכנן באמצעות מקור vpwl. בדוגמא הבאה נשתמש בפלט של סימולציה transient של המהפך (vout signal) כמתח כניסה לסימולציה חדשה. תחילה הרץ את הסימולציה המקורית עם מקור מתח vpwl :




Vout&Vin vs time

כעת במסך ה- ADE Explorer הראשי פתח את Tools → Result browser. בחלון הימני הרחב את תיקיית tran, מקש ימני על vout ו-Export. שמור את הקובץ בספרייה שלך, בחר סוג קובץ מסוג SPECTRE, הקובץ שנשמר לשם המחשה נקרא vout.in. כעת יש לערוך את הקובץ בכדי שתוכל להשתמש בו כקובץ קלט. ב-console הקש:

nedit vout.in &

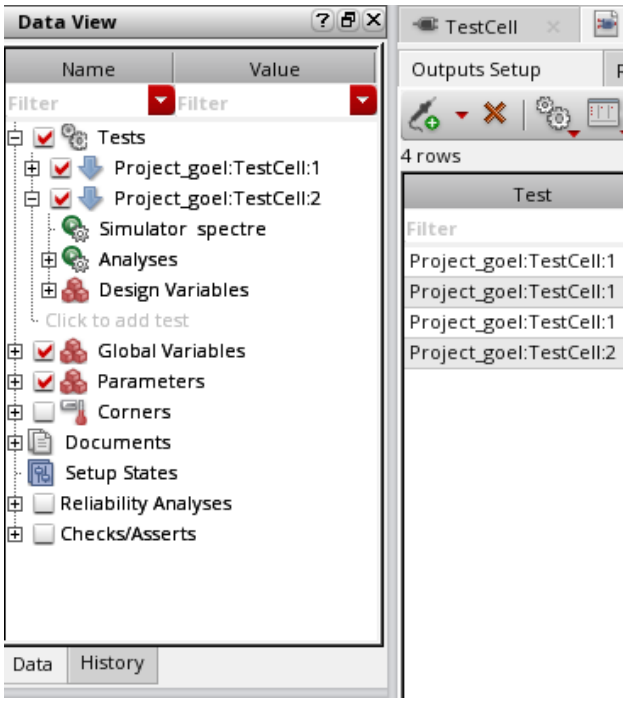
מחק את השורות הראשונות שלא מכילות נתונים מספריים.
פורמט הקובץ צריך להכיל זמן ולידו ערך בכל שורה (ללא פסיק), את הפסיקים הורד באמצעות תפריט replace→search, בשורה למעלה הקש פסיק ובשורה השניה הקש רווח, ב-replace in all לחץ על window. וודא שכל הפסיקים הוסרו. שמור את השינויים וצא מה-editor.
כעת במסך ה- schematic, הסר את אובייקט ה-vpwl, הוסף במקומו רכיב vpwlf, לחץ על Q לפתיחת ה-object properties. ב- PWL file name הקש Path מלא ושם הקובץ נתונים שיצרת לדוגמא:

/users/epxxxx/cadence/vout.in

כעת בעת הרצת המעגל יקראו הנתונים מהקובץ.

## ADE Assembler

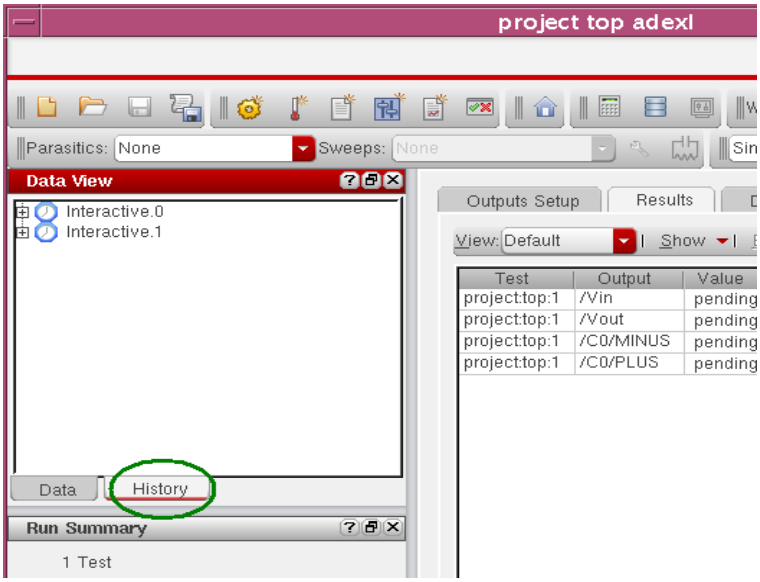
ממשק ה- Assembler מאפשר להגדיר יותר מ- test בודד. ניתן גם להגדיר tests עבור תכנונים שונים. לחיצה על הכפתור הימני כאשר הסמן בחלון השמאלי ובחירת Add Test מאפשר הוספת test חדש.




כאשר עובדים על הגדרות של test מסוים חוזרים לחלון של ADE Explorer. מ- ADE Assembler ניתן להריץ את כל ה- tests ביחד.

### סימולציות קודמות- History

ניתן לצפות בתוצאות של סימולציות קודמות המאוחסנות בדיסק על ידי שימוש בלשונית ה-History שבחלון ה-data view. כמו כן מומלץ למחוק סימולציות ישנות על מנת לשחרר מקום בדיסק על ידי קליק ימני על שם הסימולציה ו-delete.




History tab

## שרטוט LAYOUT

סעיף זה מתאר בקצרה ציור LAYOUT. יש לבצע את הפקודות הבאות בתפריט הראשי:
על מנת לבנות layout חדש תחילה יש ליצור ספריה חדשה באמצעות התפריט הראשי של התוכנה:

File→ New → Library

בחר שם חדש לספריית ה-layout, ב-Technology File סמן את Attach to an existing Technology Library. לחץ OK. בתפריט הבא בחר את ts018_prim לחץ OK.
כעת לחץ על File->New->Cellview .

library : project
cell name : layout1 (for example)
view name : layout
Open With : Layout L

יפתח חלון שבאמצעותו תוכל לצייר את המעגל שלך.
יש ללחוץ על OK לאישור.

עתה יופיע חלון לשרטוט Layout, וכן חלון נוסף המהווה את התפריט לשכבות השונות (LSW), ראה דוגמא בהמשך.
חשוב: ראשית עליך לוודא שהסריג איתו אתה עובד מתאים לטכנולוגיה. לדוגמא, עבור תהליך של 0.18u, הרזולוציה של הסריג צריך להיות 0.1u. יש לוודא כי זהו הערך שמופיע ב-Options→Display תחת Grid Controls ב-X/Y snap spacing. (0.1)
הוספת פוליגון- בוחרים את השכבה הרצויה בחלון LSW.
בחלון ה-layout בוחרים בפקודה :

Create→Shape→polygon or Create→Shape→rectangle

ומציירים את הצורה.
תחת תפריט Edit קיימות כל הפקודות הרגילות שדרושות לביצוע עריכה כגון:

move, delete, stretch, undo …

ניתן להוסיף רכיבים שעבורם קיים layout כגון טרנסיטורים, לדוגמא נוסיף טרנזיסטור pmos_18 מספריית ts018_prim. באמצעות הקשת shift+f ניתן לראות את השכבות של הטרנזיסטור.
בדרך כלל יש לבחור צורה לפני שמבצעים עליה פעולה. בחירת הצורה מתבצעת עם הכפתור השמאלי של העכבר.

מרחקים ניתן למדוד בעזרת הפקודה Tools→Create Ruler, יש לסמן את נקודת התחלת המדידה ע״י לחיצה בודדת על הכפתור השמאלי בעכבר, ׳לגרור׳ ללא לחיצה את הסרגל עד לנקודה הרצויה ולסיים את המדידה ע״י לחיצה בודדת נוספת על הכפתור השמאלי בעכבר.

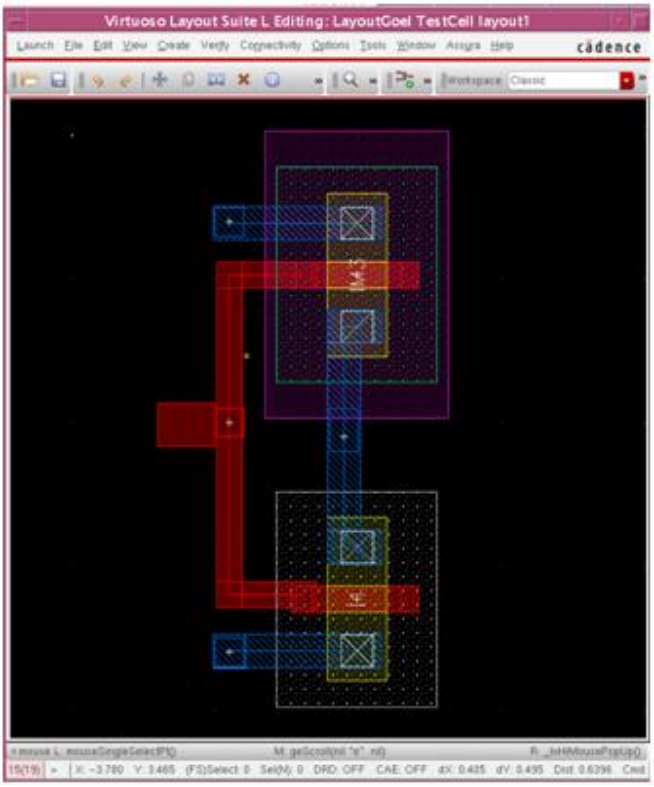
בסיום פעולת המדידה יש ללחוץ על Esc כדי להמשיך בפעולות אחרות.

כדי לבטל את הצגת הסרגלים (אם הם מפריעים) יש לבצע:

Tools→Clear All Rulers

בסיום העריכה עליך לבצע save.

דוגמא למסך המתקבל בעת העבודה ב- Layout:




Among the layers we use:

Background - Pwell
WN- Nwell
CA = diffusion area
XN = defines the active area as n+
XN = defines the active area as p+
CG = polysilicon (transistor gate)
M1 = Metal1
CS = contact between metal1 and poly or metal1 and active
V2 = contact between metal1 and metal2
And many more

**TAPS : חיבורים למצע**

יש למקם את החיבורים למצע ול- Well. ניתן לבצע זאת בעזרת Create-> Multipart Path. לאחר מכן, ללחוץ על F3 ולבחור ב- MPP Template את ה- path הרצוי (במקרה שלנו NWELL_Tap או PWELL_Tap). ממקמים NTAP ו- PTAP לפי הצורך ומבצעים חיבור ל- Vdd או gnd בהתאם בעזרת path.

## PADS

במערכת קיימות מספר ספריות המכילות מסגרות של pads מוכנים או פשוט pads בודדים. צריך לבחור את ה- pads שמתאימות לטכנולוגיה של התכנון שלך:

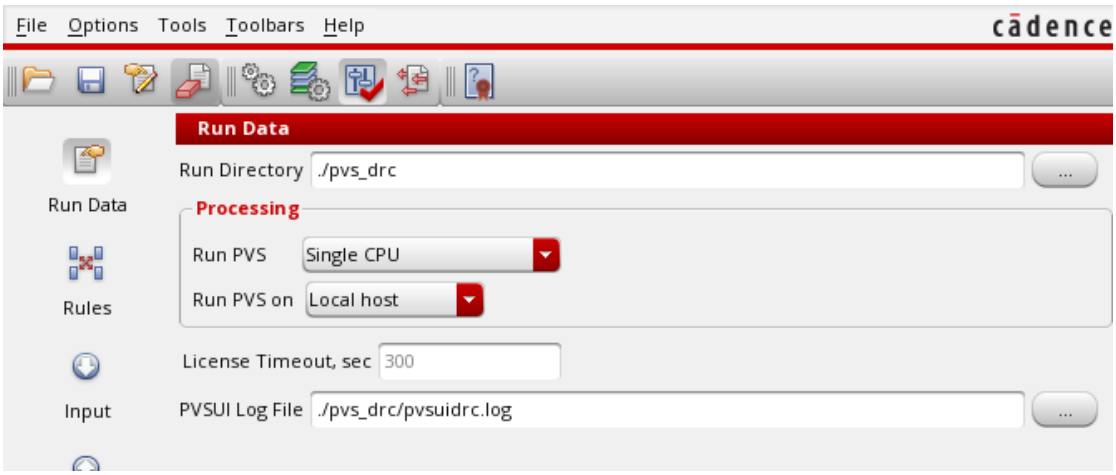
Tower 0.18u: ספרית tsl108iob הנמצא ב: /users/iit/cadence/tsl018b/tsl018b

יש להוסיף את שם הספרייה ומיקומה ב- Tools->Library Path Editor.

## בדיקת DRC (Design Rule Check) בעזרת כלי PVS עבור Tower18

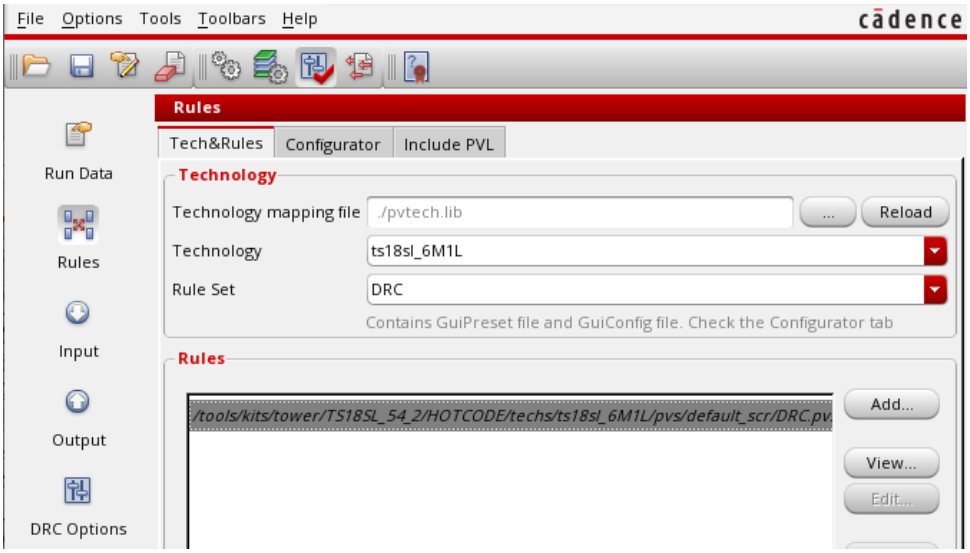
- צור ספריה בשם /tmp/usernamedrc כאשר user הוא שם החשבון שלך.
- פתח את ה- layout שיצרת.
- לחץ על PVS->Run DRC. יש למלא את הטופס בהתאם לאיורים הבאים:

Run Data

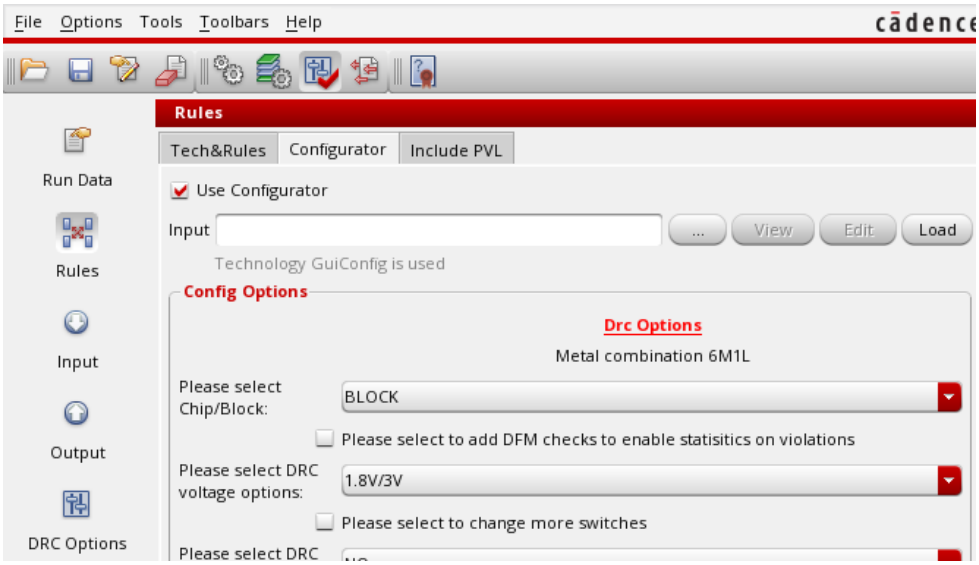



Rules

Tech&Rules



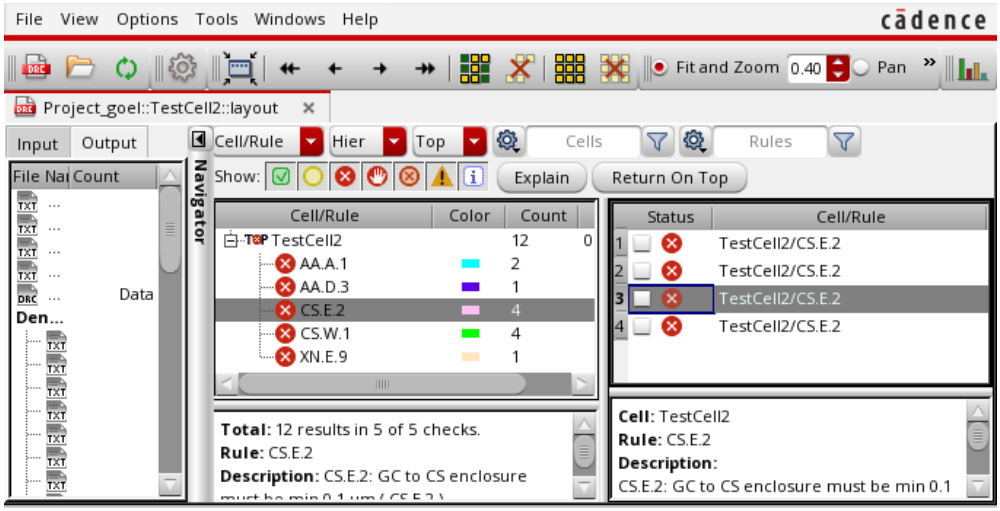
Configurator




אם מדובר על שבב שלם, יש לשנות BLOCK ל- CHIP.

להרצת הבדיקה : ללחוץ על Submit.

הצגת השגיאות :
יפתח החלון הבא :




לחיצה כפולה על כל שגיאה תבצע ZOOM לאיזור ב- layout שבו מופיעה השגיאה. יש לתקן את כל השגיאות ולהריץ שוב.

## ביצוע LVS

בדיקה זו משווה בין ה- Layout לסכמה בכל המישורים :

- התאמת בין שמות הצמתים שקבעתם בשרטוט ה- Layout מול השרטוט הסכמתי.
- התאמה בחיבוריות שבין האלמנטים.
- התאמה בערכי הרכיבים (גדלי הטרנזיסטורים, ערכי הקבלים וכו').
- התאמה במספר האלמנטים וסוגיהם.

הכנת התא להרצת LVS :

## השרטוט הסכמתי:

- הסרת כל מקורות המתח אם קיימים כאלה (הרי לא ניתן לממש מקור מתח ב Layout -), במקום מקורות המתח נציב פינים .

## שרטוט ה- Layout:

יש להוסיף את הפינים גם ל- Layout, פינים בעלי אותם שמות שקבענו ב- Schematic (עם אבחנה בין אותיות גדולות וקטנות כולל vdd! ו- gnd!), באופן הבא:
יש לבחור בשכבה (מתפריט השכבות) עליה אנחנו רוצים לסמן את הפין,
בחלון ה- Layout יש לבצע: create → pin
בחלון שנפתח יש לרשום את שם הפין (כמו ב – Schematic), להפעיל את אופציית display name, כעת יש לסמן ע"י העכבר את הפין במקום הרצוי, וכן למקם את השם.
(אין חשיבות לגודל או לגיאומטריה של הפין, אלא רק לשכבה בה הוא מצויר).

Pin : Layer M# Purpose : Drawing
Text : Layer M# Purpose : Label

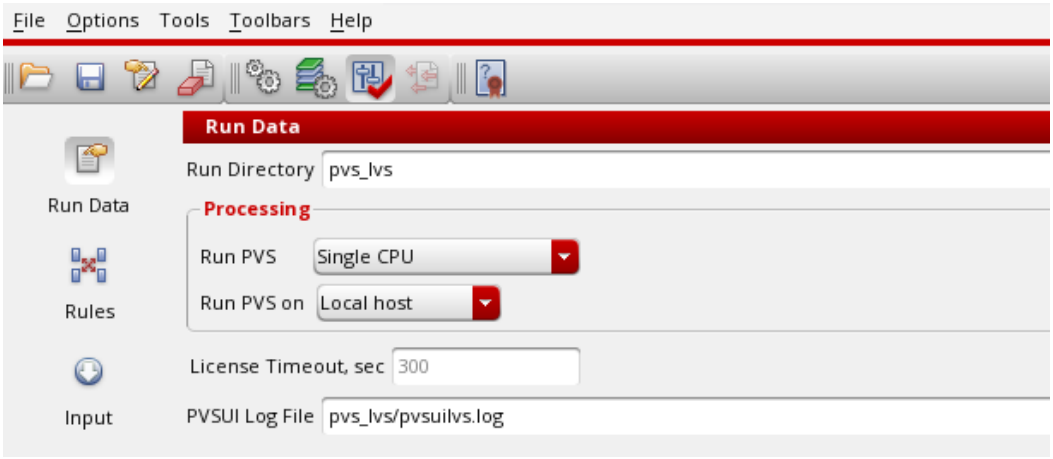
לאחר הוספת כל הפינים יש לשמור את השרטוט הסופי.

**הערה:**
עבור כל שינוי שמבוצע ב- Schematic יש לבצע check and save (ולא רק save). עבור כל שינוי שמבוצע ב- Layout יש לבצע extract מחדש.

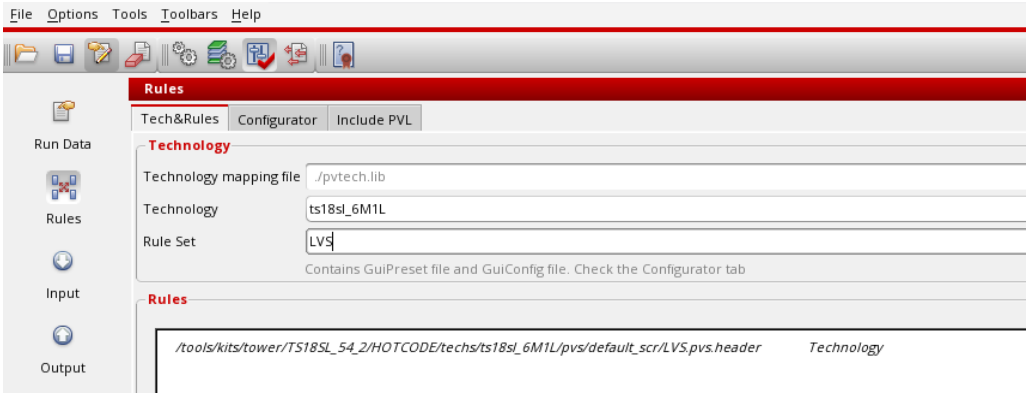
## בדיקת LVS (Layout Vs. Schematic)

- פתח את ה- layout שיצרת.
- לחץ על PVS->Run LVS. יש למלא את הטופס בהתאם לאיורים הבאים:

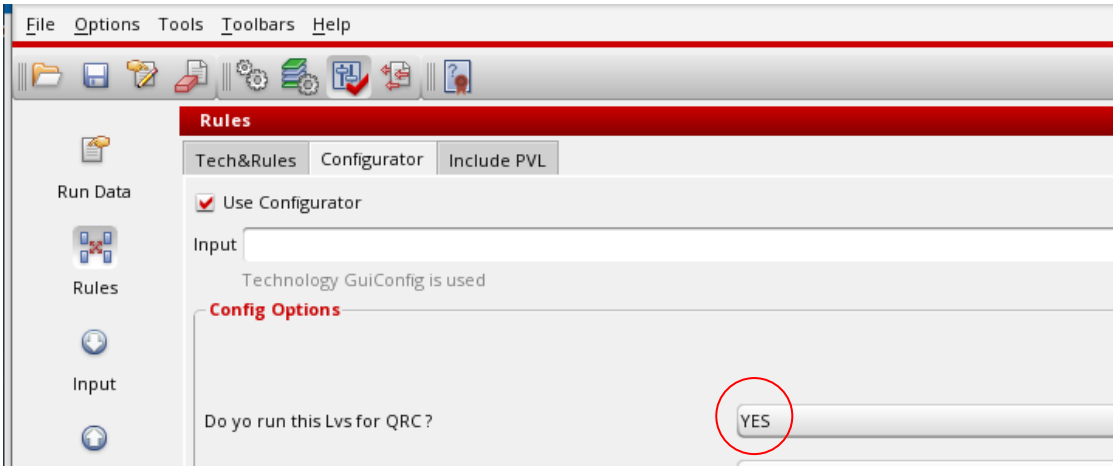
Run Data



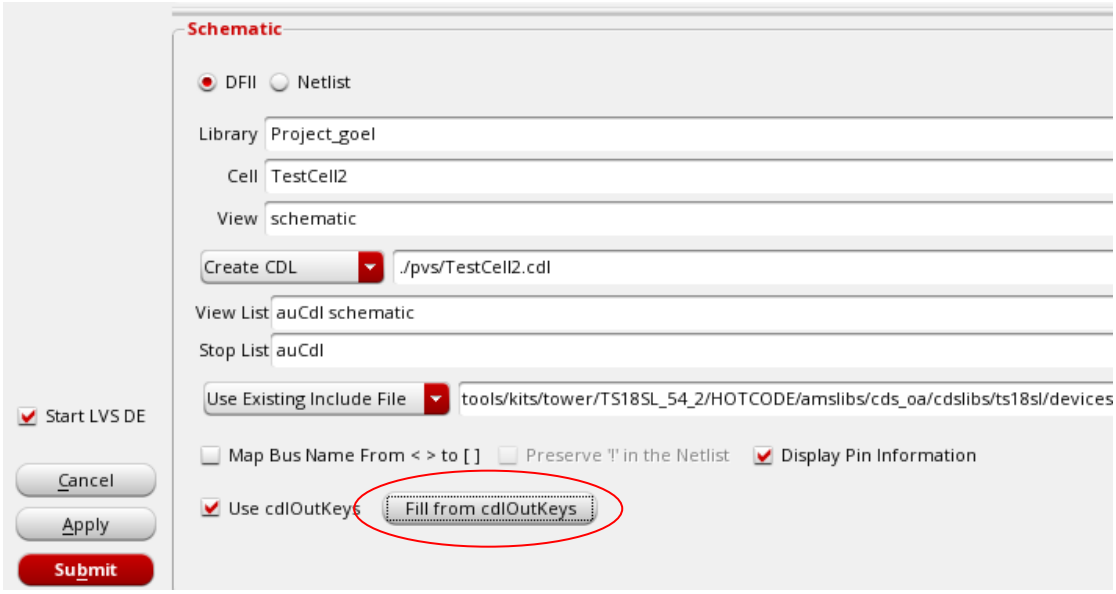

Rules : Tech&Rules



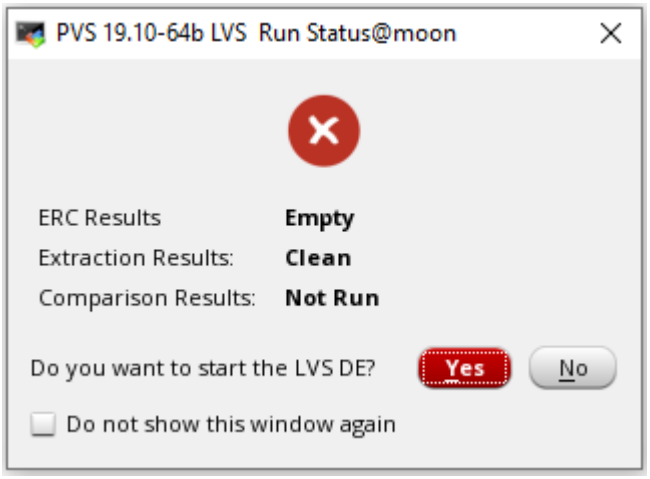
Configurator



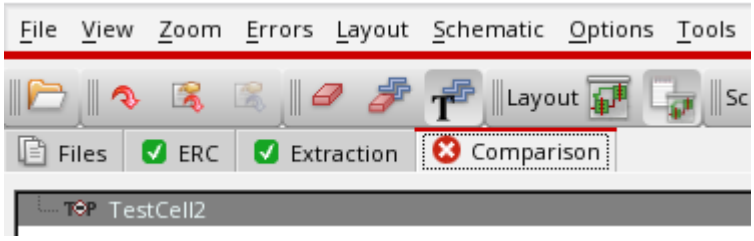

לחץ על Input בצד שמאל. לחץ על Fill from cdlOutKeys




בחלון הבא, לחץ על Yes.



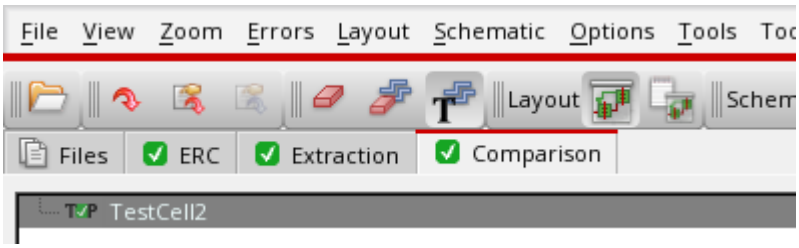
בחלון שנפתח, ניתן לראות ההצלחה או כישלון של השלבים השונים :




תחת Files ניתן לראות אל כל המידע על ריצת ה- LVS.

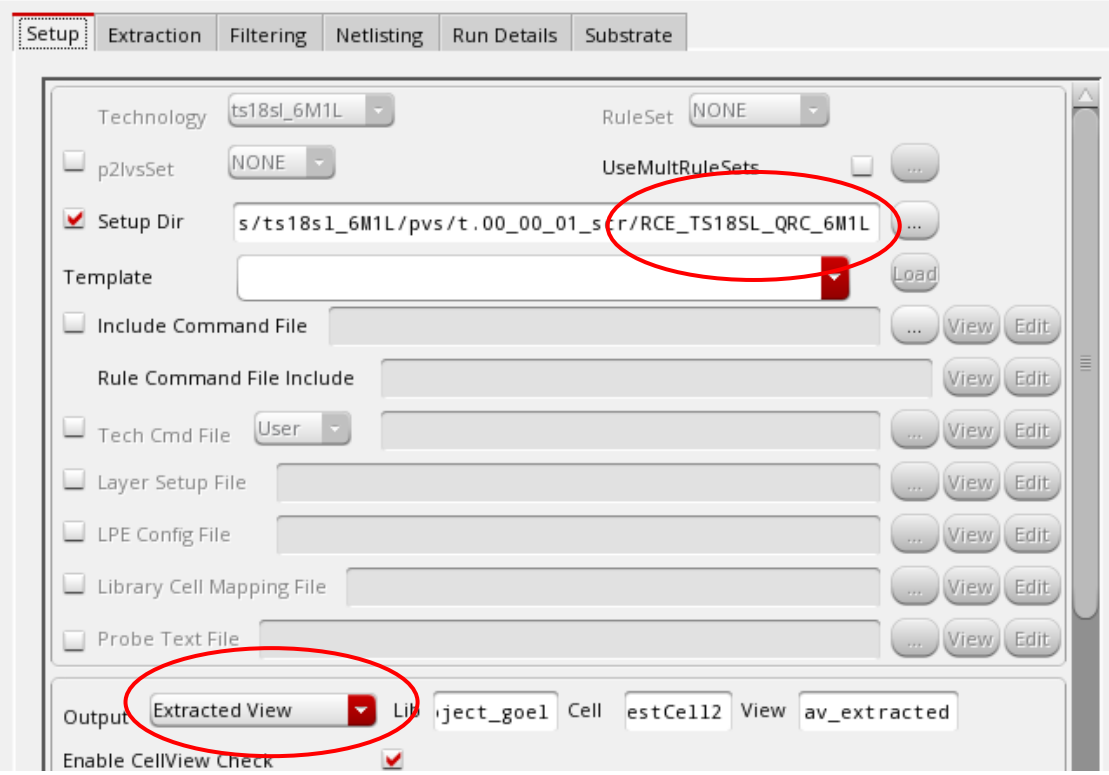
על מנת לראות את השגיאות של ה- LVS יש ללחוץ על Comparison
בצד ימין למטה יופיעו כל השגיאות. לחיצה כפולה על כל שגיאה תוביל להצגת ההתקן הבעיתי.
לאחר התיקונים, ניתן ללחוץ על ReRun באחד חלונות ה- LVS על מנת להריץ מחדש.

קבלה וי ירוק עבור ERC, Extraction ו- Comparison מציין שהבדיקה הצליחה והתכנונים זהים.




## יצירת Extracted View – Quantus

ה-Extracted View נחוץ על מנת לאפשר הרצת סימולציה על ה-Layout. לפעמים הוא גם עוזר במציאת שגיאות ב-LVS. על מנת להריץ Quantus, חובה קודם להריץ LVS. לאחר ביצוע ה-LVS בחר ב-Run PVS-Quantus→Quantus ולחץ על OK בחלון שנפתח.
בחלון הבא שנפתח בלשונית ה-Setup, רשום בשדה ה-Technology בחר בטכנולוגיה הנכונה. לדוגמא ts18sl_6M1L.
יש להוסיף ל- Setup Dir את RCE_TS18SL_QRC_6M1L כפי שמופיע בחלון. בנוסף עבור Output יש לבחור Extracted View.




לחץ על לשונית ה-Extraction. עבור Extraction Type בחר בסוג הרצוי, לדוגמא C Only. בשדה ref node רשום את צומת היחוס של המעגל (!gnd, vss למשל). לחץ על OK. ניתן לצפות ב-log על ידי לחיצה על watch log file. בתום הריצה יווצר תא מסוג av_extracted.

## הרצת סימולציה על ה-layout

פתח את ה-schematic המכיל את המהפך ומקורות המתח. פתח או צור את סביבת הסימולציה adexl. כעת בחלון ה-ADE XL test editor טען state קיים או הגדר אחד חדש כפי שמוסבר בפרק הסימולציות. נגדיר לסימולטור לעבוד עם תא ה-layout במקום תא ה-schematic של ה-inverter- הקש על Setup→Environment.
בשורה switch view list הוסף את המילה av_extracted לפני המילה schematic, לחץ OK והרץ את הסימולציה. הסימולציה תרוץ על התא מסוג av_extracted שיצרת.

## Spice Netlists imports using SpiceIn

באמצעות כלי זה ניתן לייבא netlists של CDL, HSpice, Spectre, Spice וליצור מהם virtuoso -schematics, netlists, symbols views. בדוגמא הבאה נייבא את Spice netlist בכדי ליצור virtuoso schematic.
קוד לדוגמא :

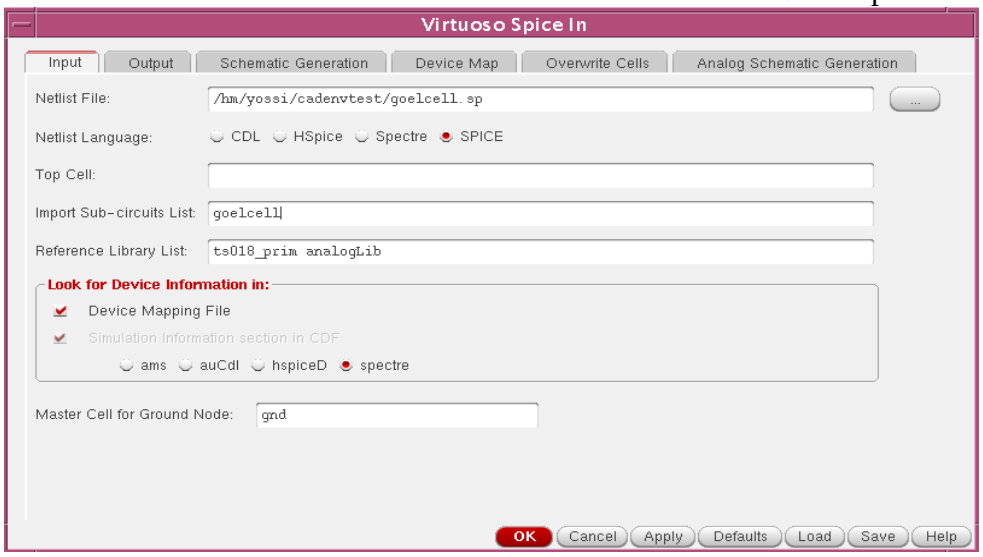
```
*
.SUBCKT goelcell vdd! gnd! in out
*
*
*  caps2d version: 9
*
*
*       TRANSISTOR CARDS
*
*
M2      out     in      gnd!    gnd!    N18     L=0.18U W=0.42U
M3      out     in      vdd!    vdd!    P18     L=0.18U W=0.42U
*
*
*       CAPACITOR CARDS
*
*
C1      vdd!    gnd!    2.341E-16
C2      in      gnd!    5.390E-16
C3      out     gnd!    1.589E-16
*
*
.ENDS goelcell
*
```

Spice netlist file

**ייבוא הקוד**

בחלון הראשי של התוכנה לחץ על File→import→Spice.

חלון ה-Spice In יפתח:




Spice-In Menu

בלשונית ה-input, יש לרשום את שם הקובץ ב- Netlist File. יש לסמן SPICE ב- Netlist Language. ב-import sub-circuits List יש לבחור את שם ה-cell כפי שהוא מופיע בקובץ.

ניתן לראות ששם ה-sub circuit בקובץ הוא goelcell (תמיד מופיע אחרי subckt).
הערה - בדוגמא זו יש sub-circuit אחד אך במקרים רבים יהיו תאים רבים וגם היררכיה של תאים. עבור הגדרות מתקדמות יש לעיין ב-virtuoso help manual, יש לחפש בנושא netlist import using spicein.
ב-Reference Library List יש להוסיף את ts018_prim ואת analogLib. יש לסמן וי ב- device mapping file. בלשונית ה- output יש לפרט את מיקום הספרייה בה ישמר ה-schematic.

**יצירת Device Map File**

הרכיבים (P18, N18 והקבלים שבדוגמא) כפי שהם מוגדרים בקובץ ה-spice אינם מוכרים למערכת ויש לפרט באמצעות קובץ מיפוי את שמות הרכיבים כפי שהם מופיעים בספריות. יש ליצור קובץ חדש באמצעות nedit ולהגדיר עבור כל רכיב את שמו בספרייה באמצעות הפקודה devSelect:

devSelect := N18 nmos_18
devSelect := P18 pmos_18
devSelect := capacitor cap

פקודה זו ממפה לדוגמא את N18 שבקובץ ה-Spice ל-nmos_18 שמופיע בספריית-ts018_prim, החיפוש מתבצע בכל הספריות שפורטו ב-Reference Library List. יש לשמור את השינויים ולטעון בלשונית Device Map את הקובץ (לחיצה על File→open).
במידה וכל הרכיבים הוגדרו כראוי, לחיצה על OK תיצור את ה-schematic בספריית ה-output שהוגדרה. שגיאות יוצגו על ידי ה-log. ניתן להגדיר overwrite (בלשונית overwrite cells) במידה וכבר יצרתם schematic וברצונכם "לדרוס" אותו.

## סימולציית hspiceD

במסך Test editor של ADEXL, בחר Setup→Simulator ובחר ב-hspiceD.
עבור סימולציות hspice לא מוגדרים קבצי מודלים, כלומר המערכת לא מבינה איך מתנהגים הרכיבים ויש להגדיר את התנהגותם בקובץ מודלים. מודלים של רכיבים ניתן למצוא באינטרנט. לדוגמא BSIM: BSIM Homepage - Offical Site. ניתן למצוא קבצי מודלים ב- example netlists.
את קובץ המודלים יש להוסיף בתפריט Setup→Model libraries של ה-Test Editor, לחיצה על שורה ריקה והוספת ה-path. יש להסיר הפניות לקבצי scs מאחר ואלו קבצי מודלים עבור spectre.

**דוגמא**

עבור מעגל המהפך, השתמשנו ברכיבי nmos4 ו-pmos4 שבספריית analogLib. כעת נעשה שימוש בקובצי מודלים מסוג BSIM3 עבור nmos ו-pmos שהורדו מ-
http://www-device.eecs.berkeley.edu/~bsim3/ftpv330/test/modelcard.nmos
http://www-device.eecs.berkeley.edu/~bsim3/ftpv330/test/modelcard.pmos

שני הקבצים אוחדו לקובץ אחד בשם models.m (לא חובה) ושמות הרכיבים בקובץ שונו לnmos ו- pmos בכדי שיתאימו לשמות הרכיבים במעגל המהפך. הפניה לקובץ נוספה בתפריט Setup→Model libraries. כעת ניתן להריץ סימולציות hspice על מעגל המהפך.