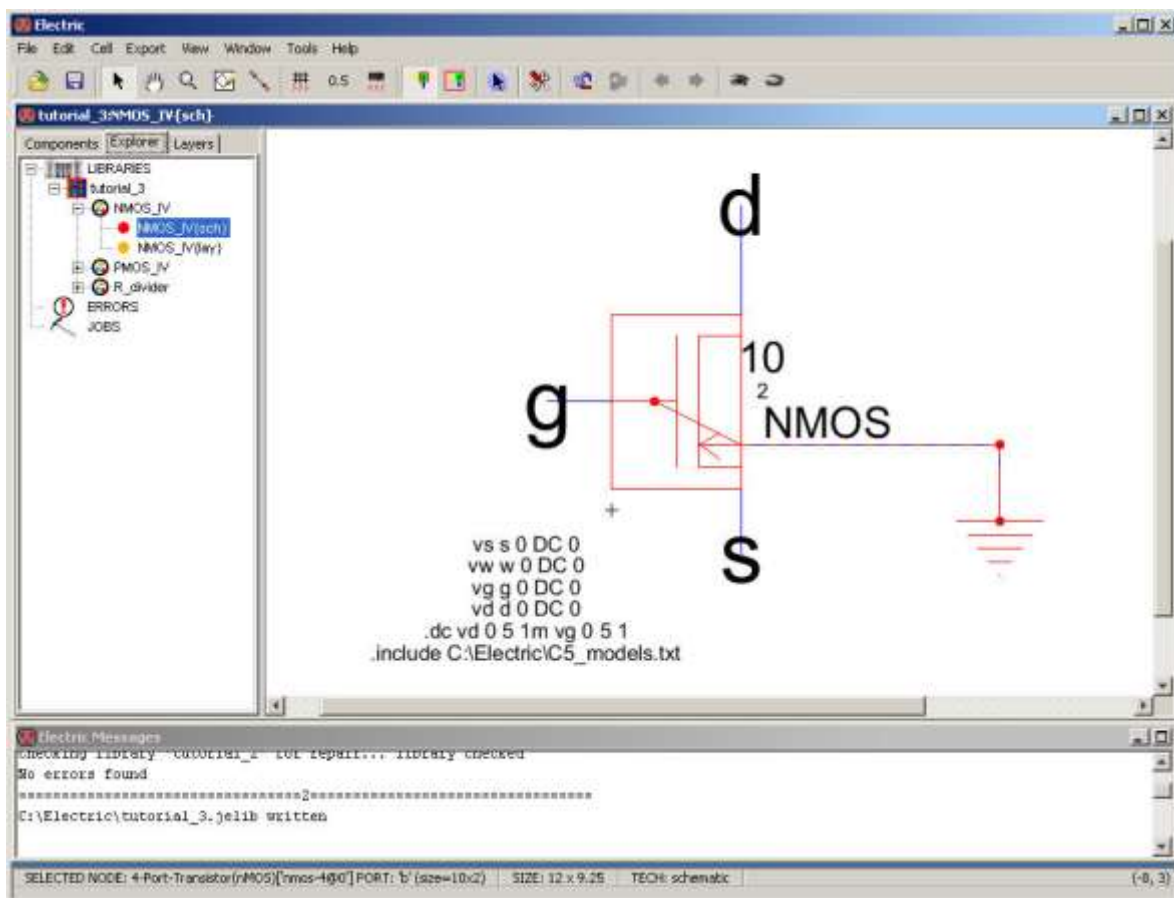


Tutorial 3 – Σχεδιασμός και προσομοίωση ενός αναστροφέα CMOS

Στο tutorial αυτό θα σχεδιάσουμε και θα προσομοιώσουμε έναν αναστροφέα CMOS χρησιμοποιώντας τις ρυθμίσεις από τα tutorial_1, tutorial_2 και από την διαδικασία C5 (C5 process)

Ξεκινάμε φορτώνοντας την βιβλιοθήκη tutorial_2.jelib και αποθηκεύοντάς την ως tutorial_3.jelib στον φάκελο C:\Electric, στον οποίο φροντίζουμε να υπάρχει και το αρχείο C5_models.txt για τις προσομοιώσεις με το SPICE. Στη συνέχεια ανοίγουμε το cell NMOS_IV{sch} και επιλέγουμε το **nMos Node** και με Ctrl+C ή χρησιμοποιώντας το μενού Edit -> copy αντιγράφουμε το nMos Node στο clipboard. Με την αντιγραφή έχουμε έτοιμες τις διαστάσεις W και L του τρανζίστορ καθώς και το μοντέλο SPICE. Στη συνέχεια δημιουργούμε ένα νέο cell, Cell -> New Cell (ή πληκτρολογούμε Ctrl+N) και του δίνουμε το όνομα: **inv_20_10**, έχοντας επιλεγμένο το schematic view.

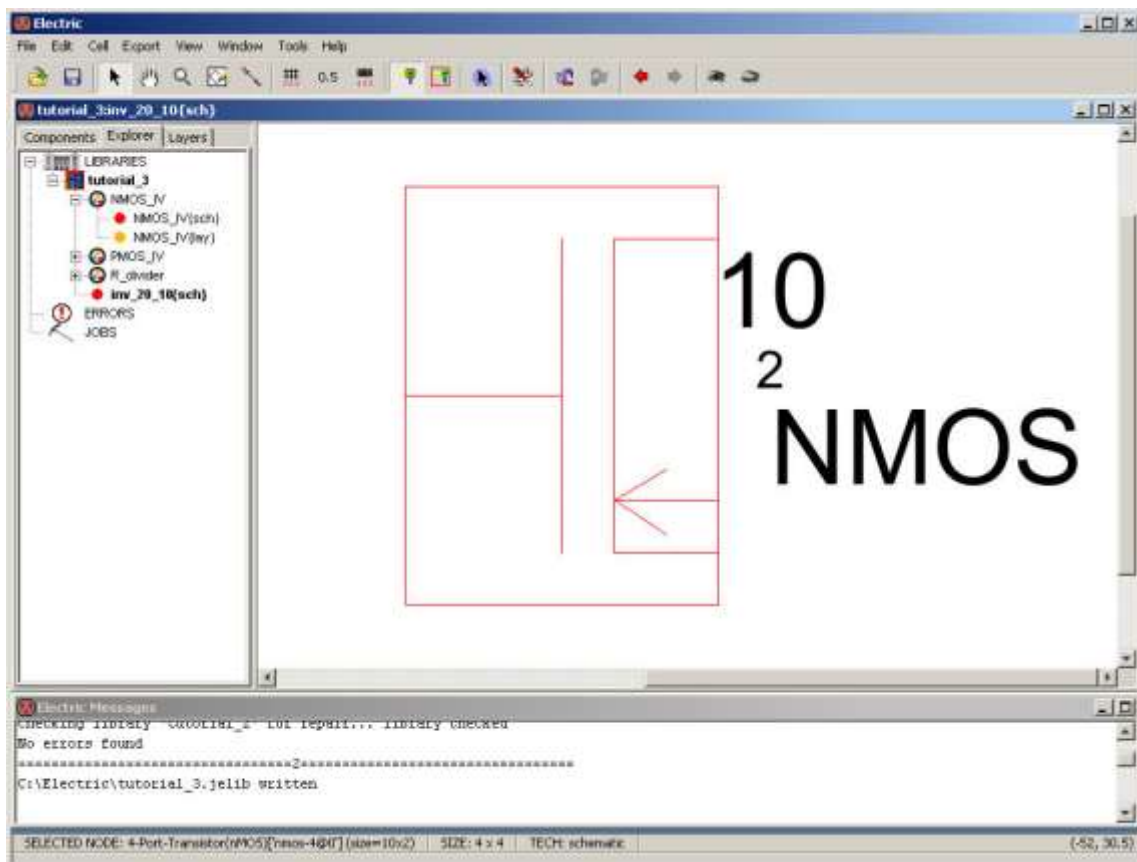


Η ονομασία δείχνει ότι το τρανζίστορ PMOS έχει πλάτος $w=20$ και το NMOS $w=10$. Στη συνέχεια επικολλούμε το nMos Node με Ctrl+V στο νέο cell.

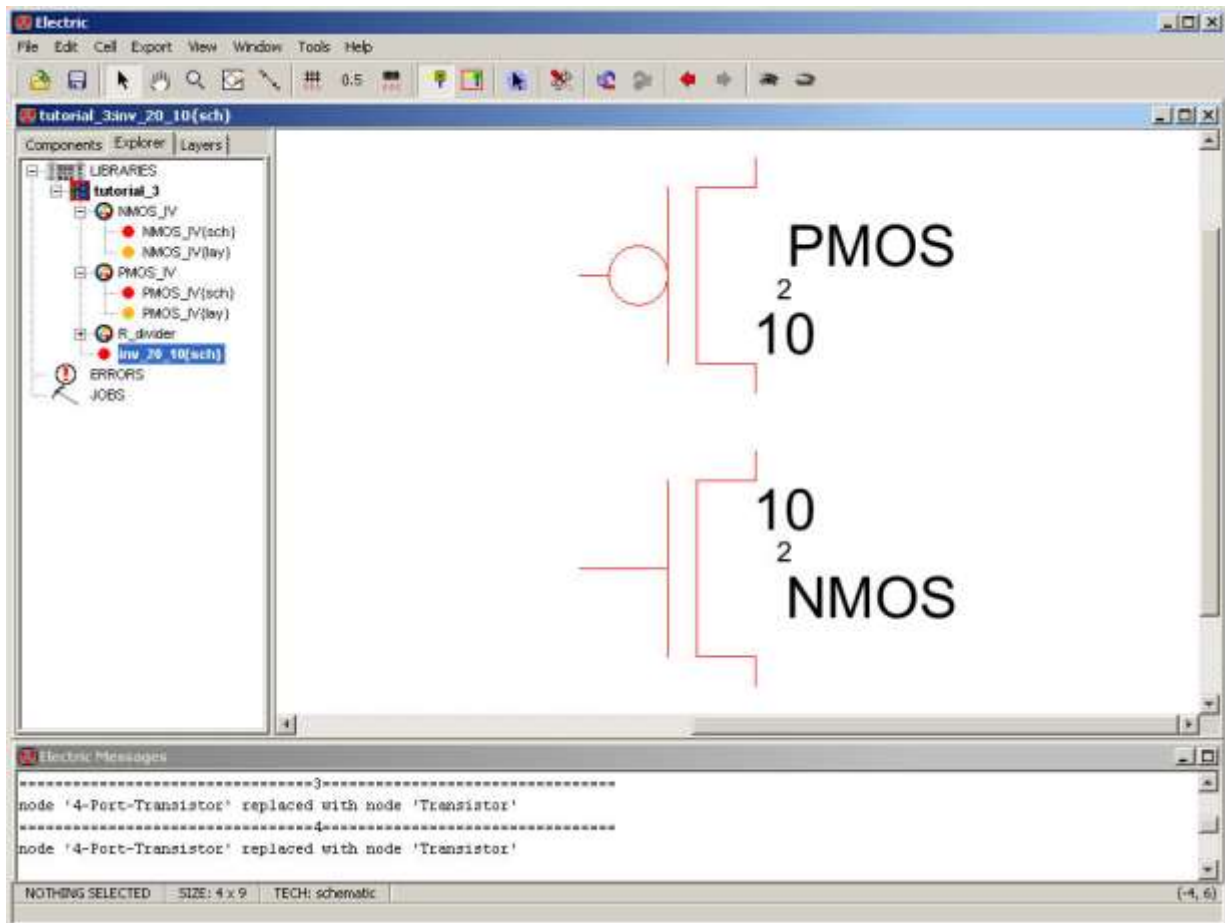
Στα ψηφιακά κυκλώματα το body (το p-substrate ή p-well) των nMos τρανζίστορ είναι πάντα συνδεδεμένο στη γη, επομένως για να είναι απλούστερη η σχεδίαση θα επιλέξουμε ένα σύμβολο για το τρανζίστορ με τρεις ακροδέκτες.



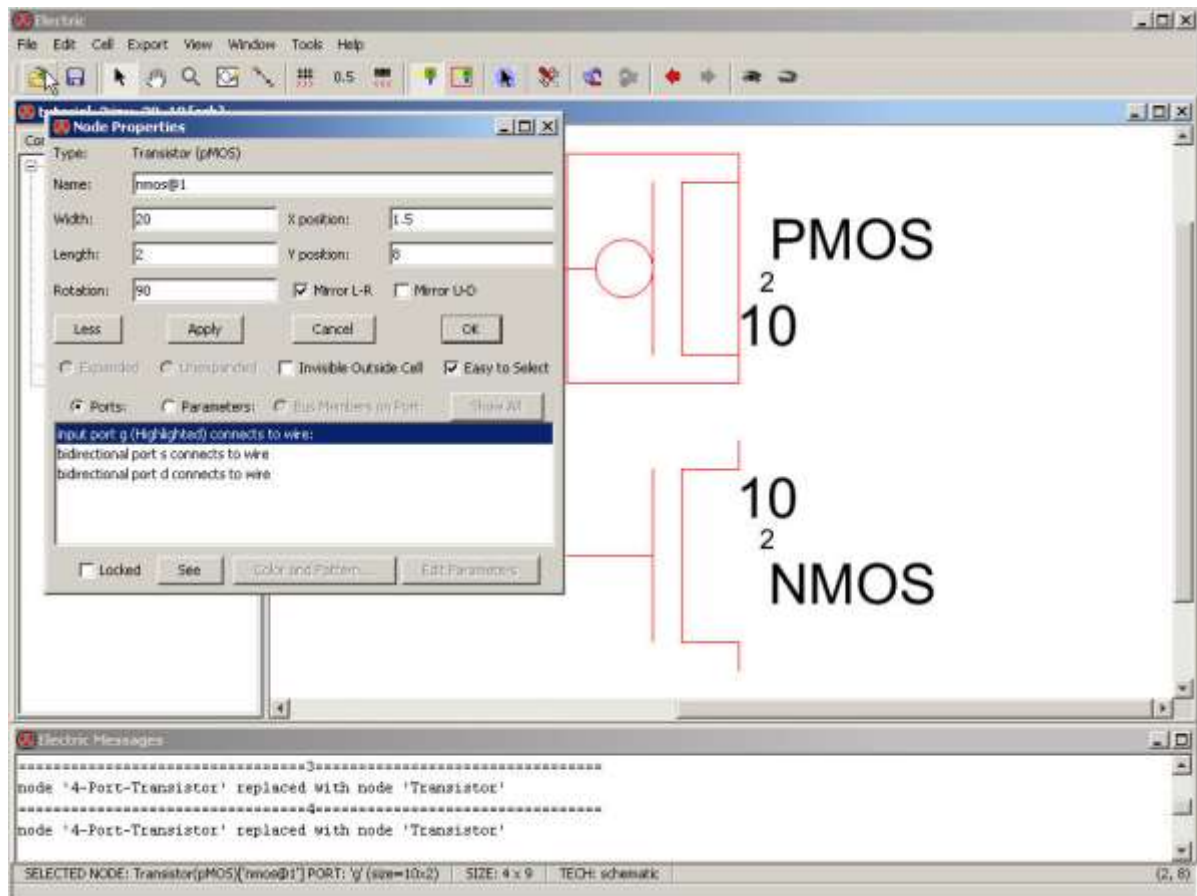
Με επιλεγμένο το nMos Node πηγαίνουμε στο μενού Edit -> Change (ή απλά πληκτρολογούμε Ctrl+C) και αλλάζουμε το Node με ένα τρανζίστορ όπως αυτό που φαίνεται παρακάτω και πιέζουμε διαδοχικά, πρώτα Change και μετά Done.



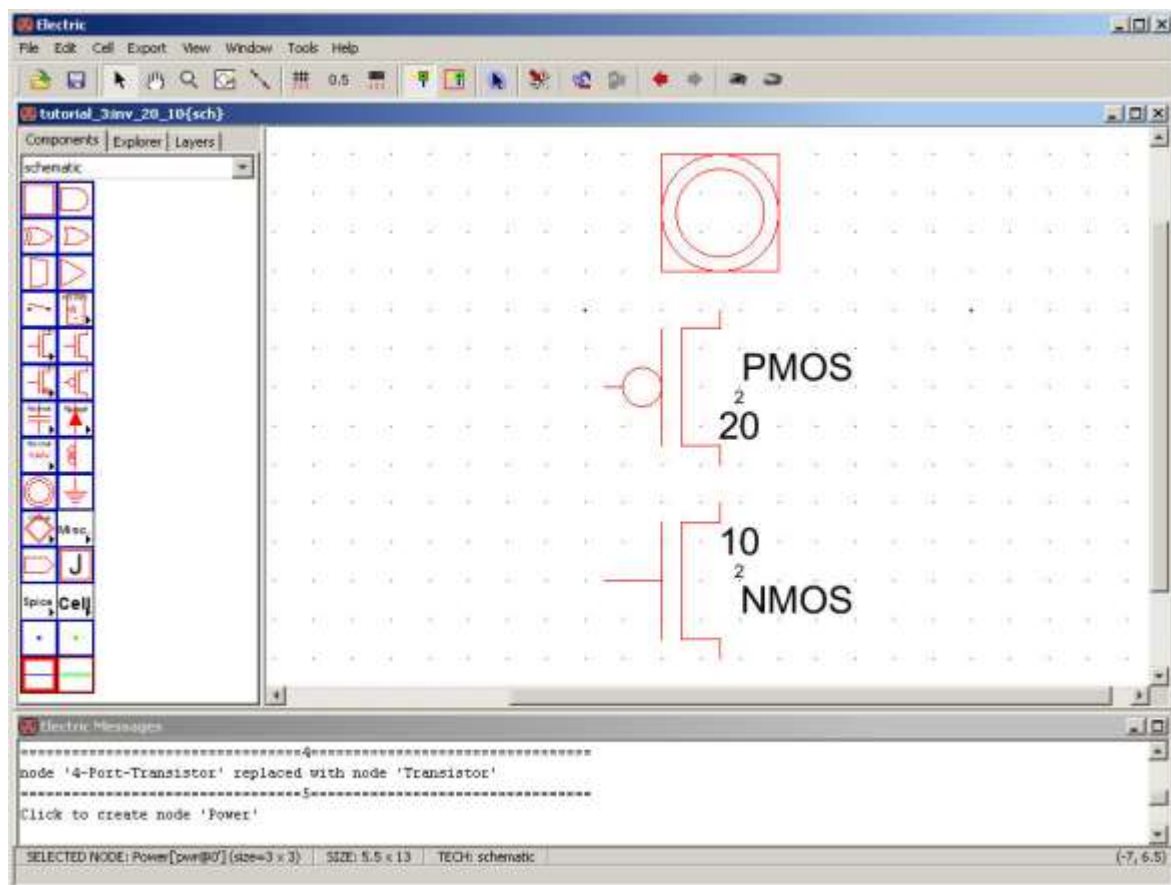
Επαναλαμβάνουμε τα προηγούμενα βήματα για το pMos Node στο cell PMOS_IV και αντιγράφουμε όπως φαίνεται παρακάτω:



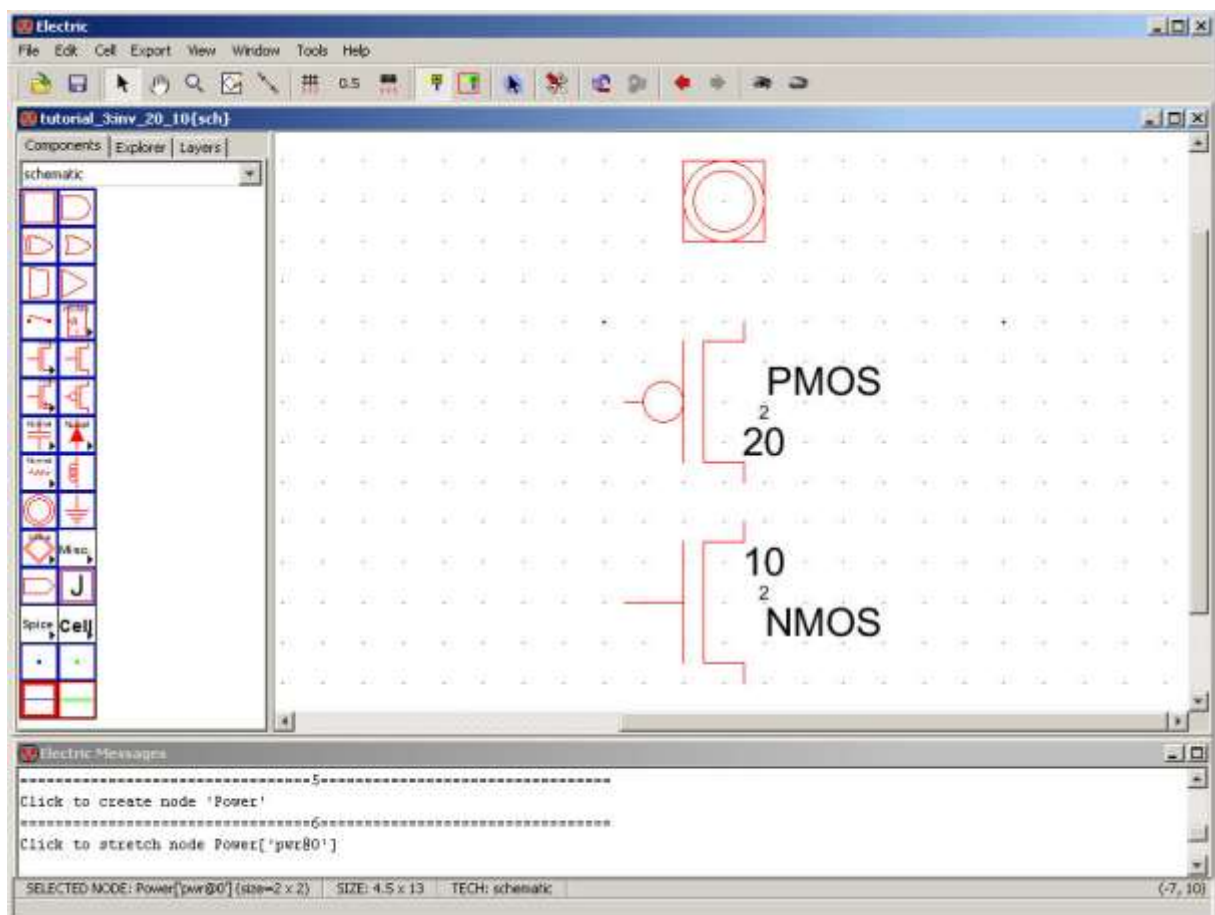
Αλλάζουμε και το πλάτος του PMOS ώστε να έχει την τιμή 20 (by editing pMos Node's properties)



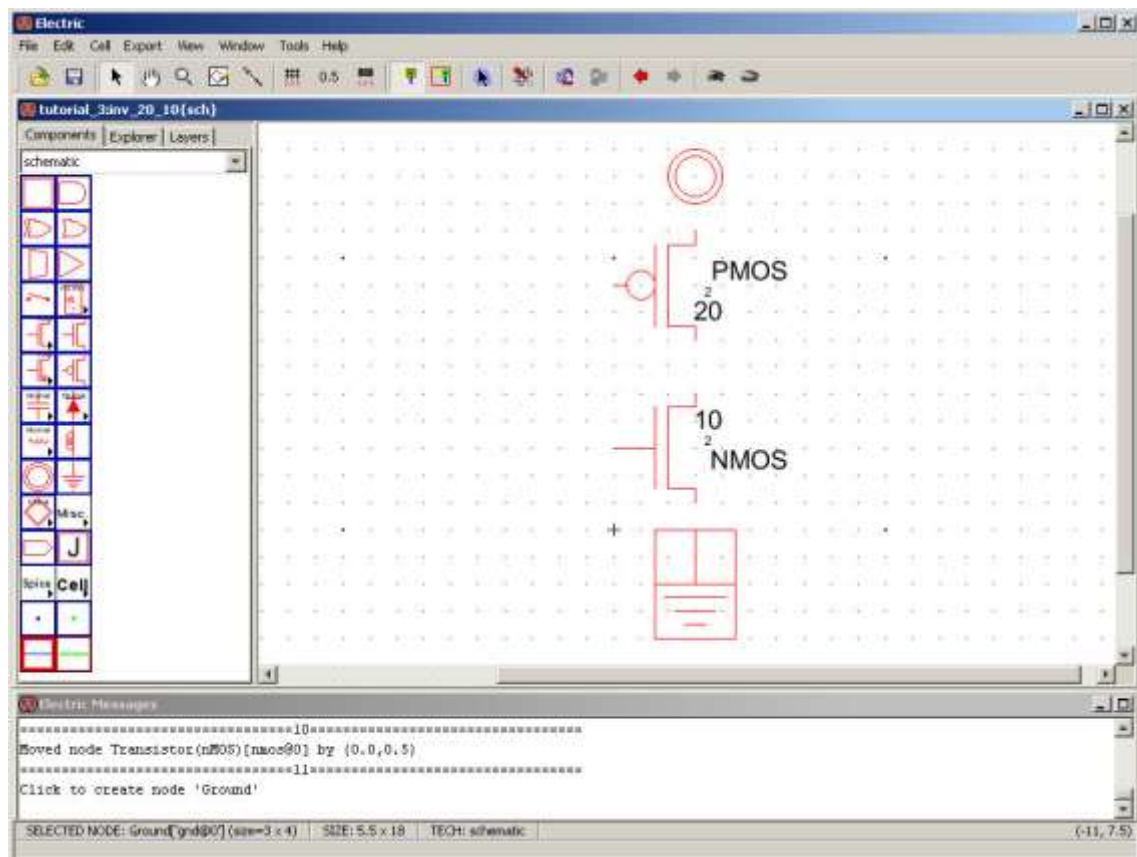
Στη συνέχεια ενεργοποιούμε το grid και τοποθετούμε το σύμβολο της τροφοδοσίας όπως παρακάτω:



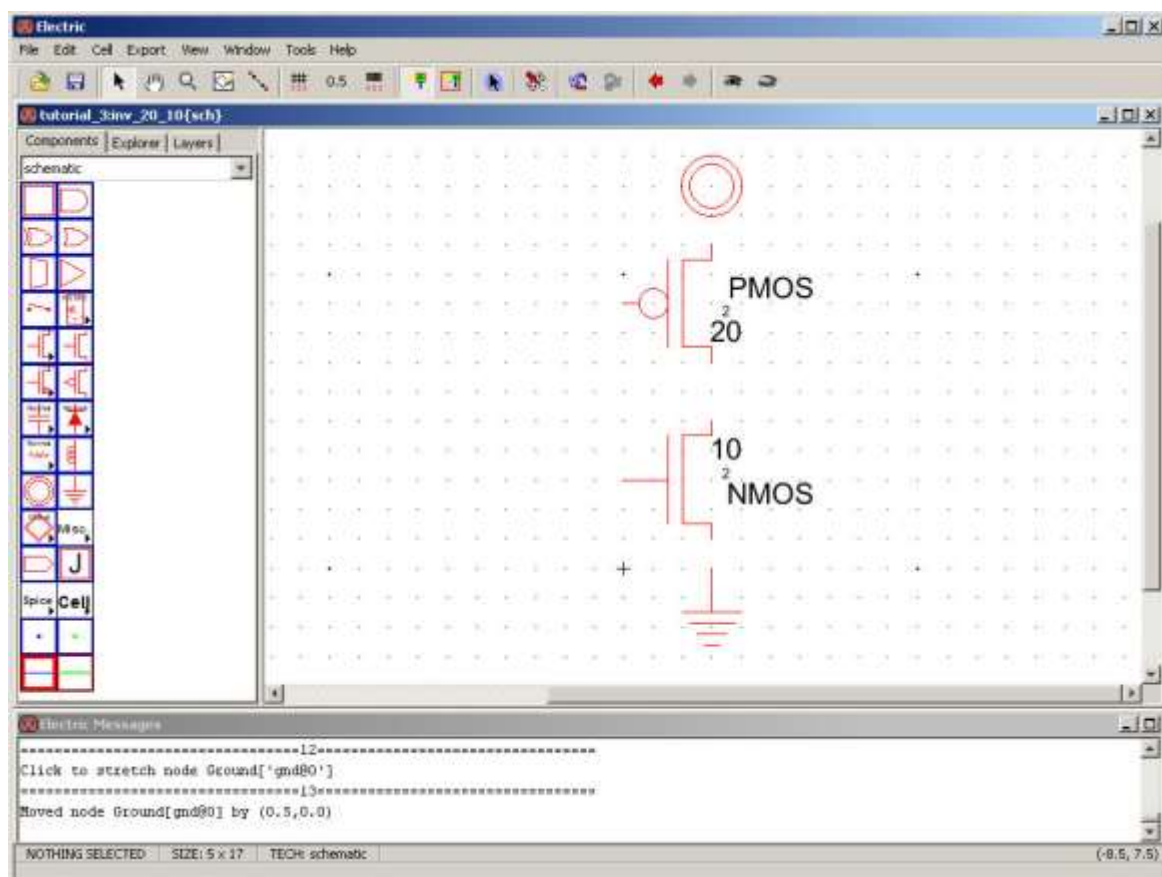
Έχοντας επιλεγμένο το σύμβολο της τροφοδοσίας πηγαίνουμε στο μενού Edit -> Size -> Interactively (ή απλά πληκτρολογούμε Ctrl+B) για να μειώσουμε το μέγεθος του συμβόλου της τροφοδοσίας



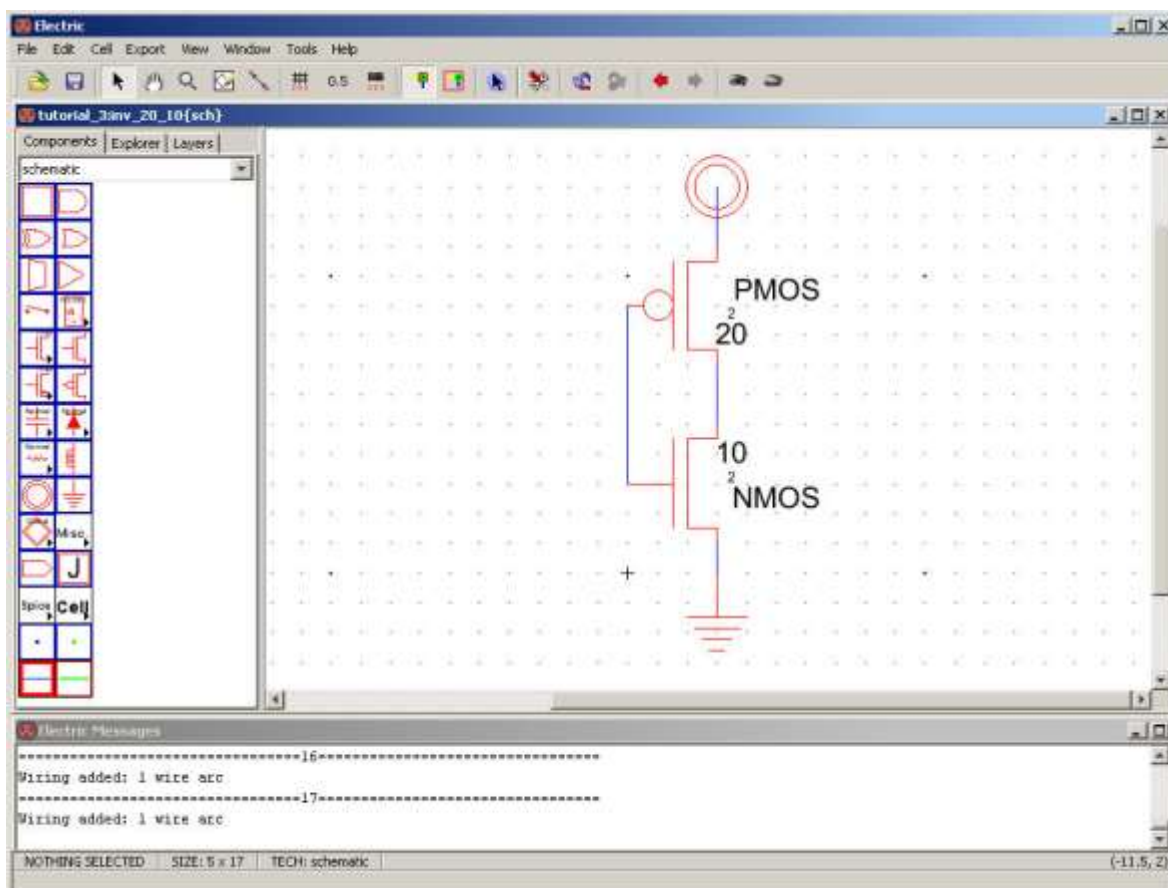
Μετακινούμε τα σύμβολα ώστε να ευθυγραμμιστούν στο πλέγμα (grid) και τοποθετούμε το σύμβολο της γης.



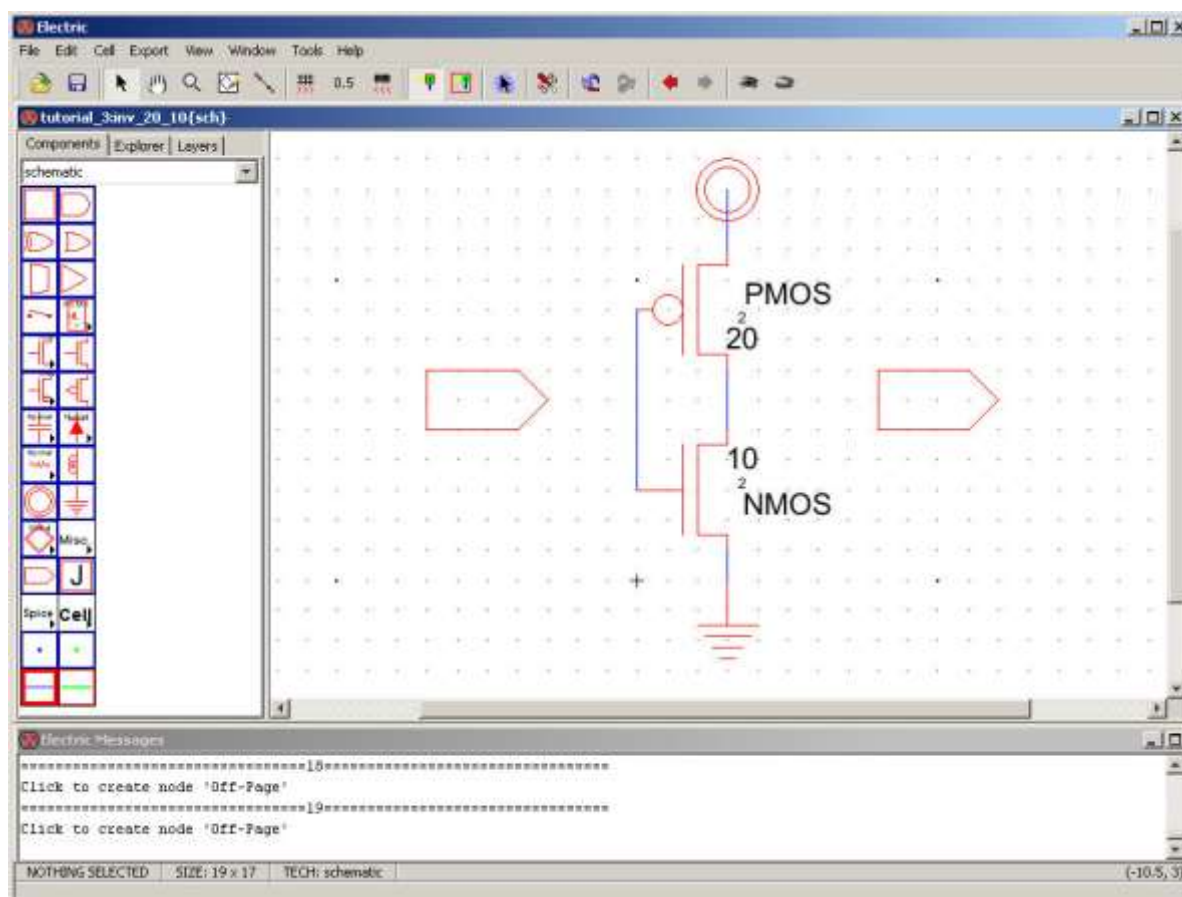
Στη συνέχεια μειώνουμε το μέγεθος του συμβόλου της γης (gnd Node) ώστε να έχει και αυτό μικρότερες διαστάσεις από τα τρανζίστορ και μετακινούμε κατάλληλα ώστε να ευθυγραμμιστεί με το πλέγμα, όπως φαίνεται παρακάτω:



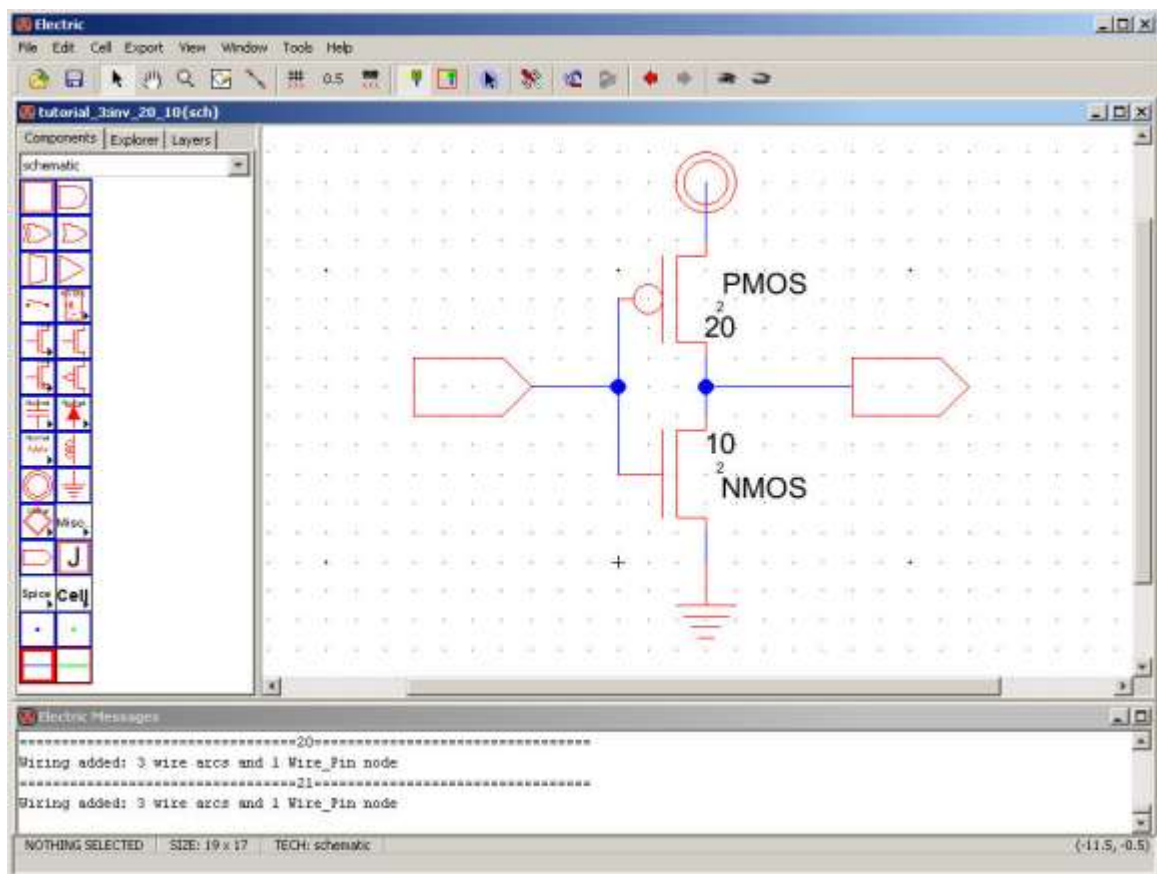
Με αριστερό κλικ επιλέγουμε ένα port από κάθε ένα Node και με **δεξί** κλικ κάνουμε μια σύνδεση χρησιμοποιώντας το Arc wire για να σχηματιστεί το κύκλωμα του αναστροφέα όπως φαίνεται παρακάτω:



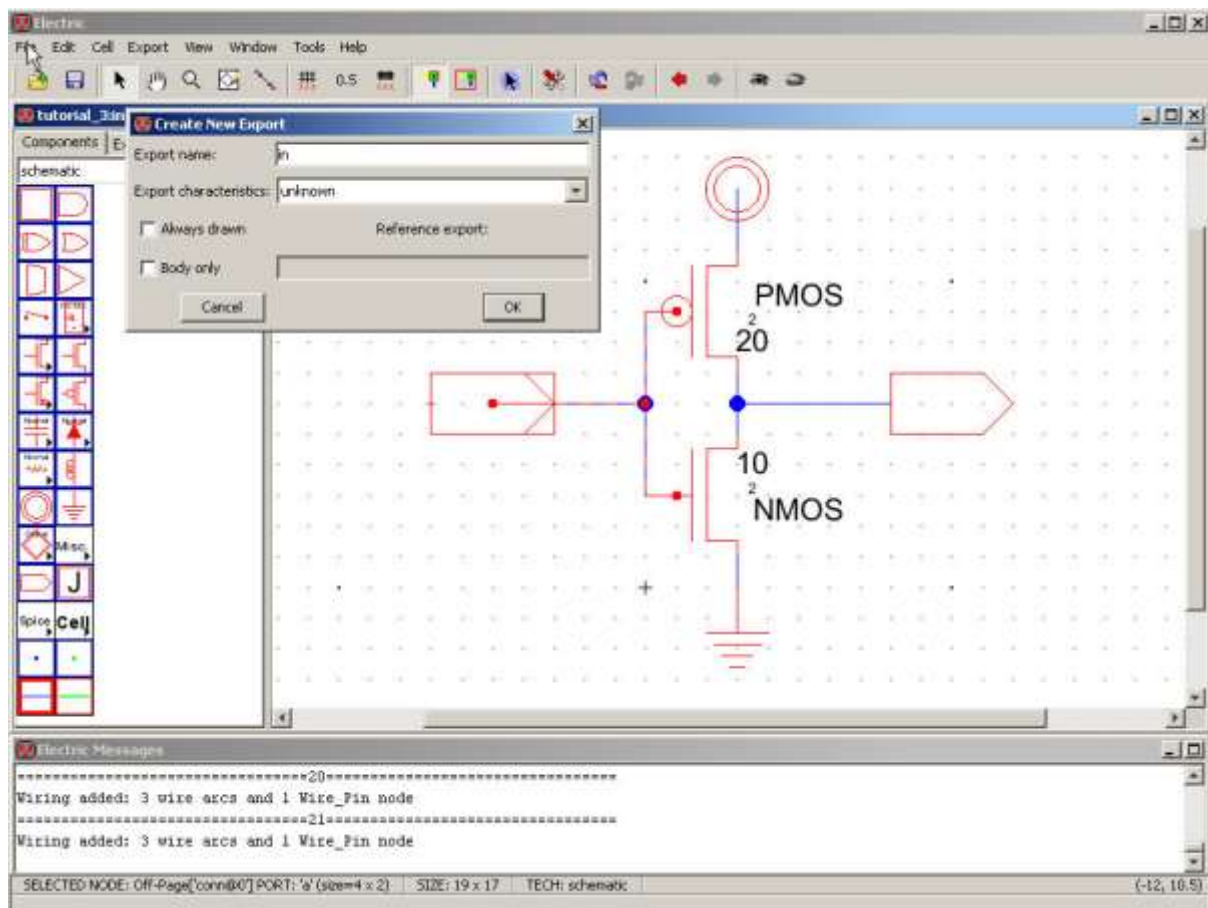
Στη συνέχεια θα προσθέσουμε δύο Nodes Off-Page. Αυτά τα Nodes έχουν ports και στις δύο πλευρές τους, δηλαδή και δεξιά και αριστερά και μπορούμε να χρησιμοποιούμε οποιοδήποτε port.



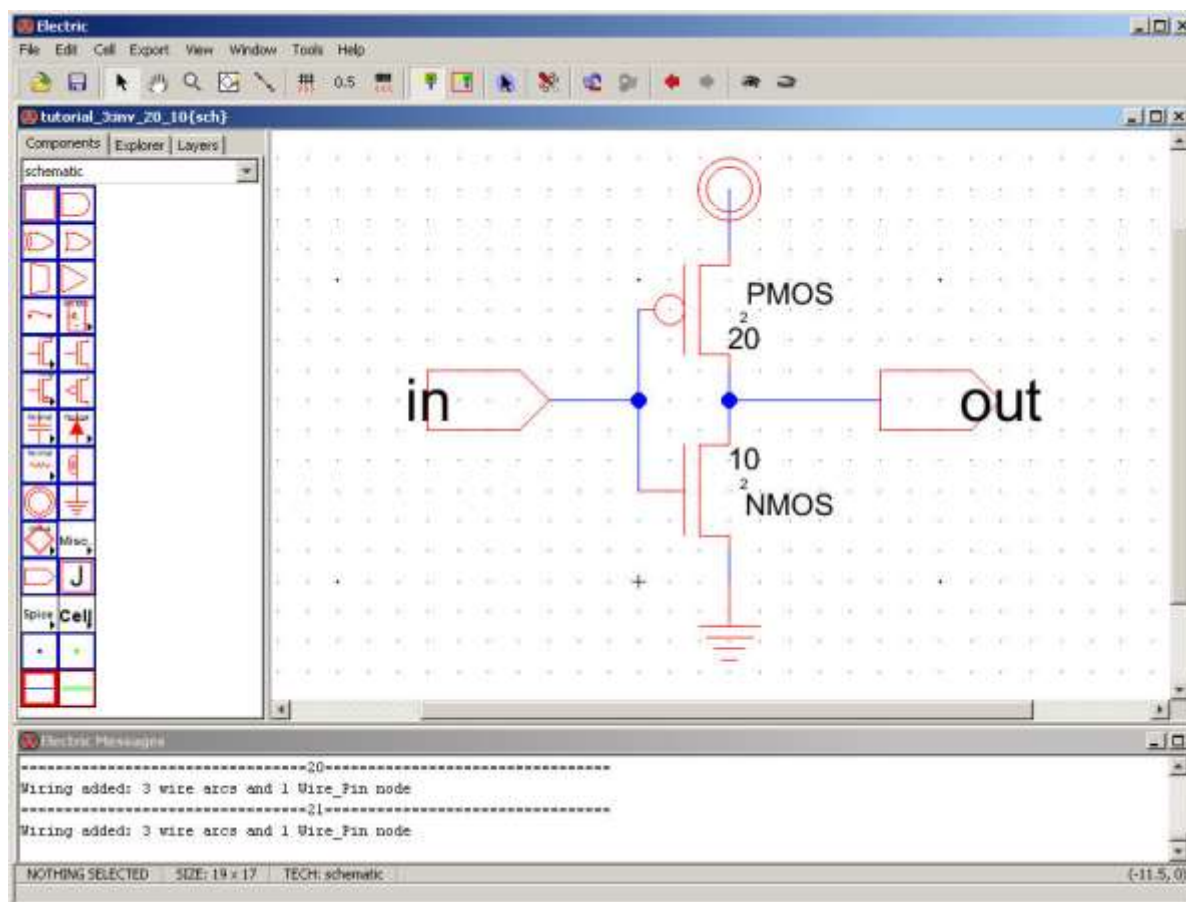
Συνδέουμε τα δύο Off-Page Nodes με καλώδια (wire Arc's) όπως φαίνεται παρακάτω:



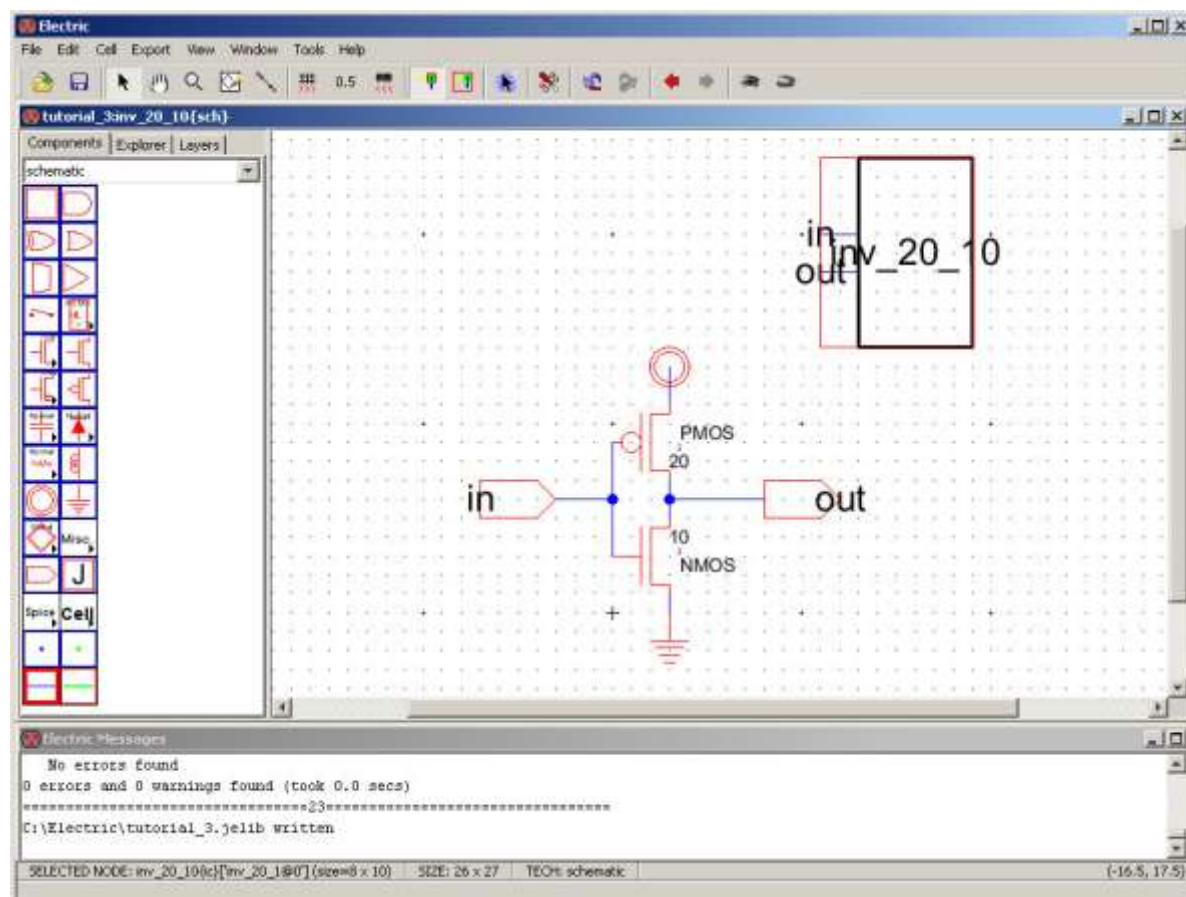
Στη συνέχεια θα κάνουμε Export την είσοδο και την έξοδο του αναστροφέα πηγαίνοντας στο μενού και επιλέγοντας Export -> Create Export (ή Ctrl+E) εφόσον πρώτα έχουμε επιλέξει το αριστερό port στην είσοδο του αναστροφέα, όπως φαίνεται παρακάτω:



Επαναλαμβάνουμε για το δεξί Off-Page Node της εξόδου και πληκτρολογούμε F5 για έλεγχο λαθών.



Εφόσον δεν βρεθεί κανένα λάθος μπορούμε να προχωρήσουμε στην δημιουργία ενός συμβόλου (icon view) για τον αναστροφέα. Πηγαίνουμε στο μενού View -> Make Icon View και μόλις τελειώσουμε θα εμφανιστεί στο πάνω δεξί τμήμα του σχηματικού το εξής:

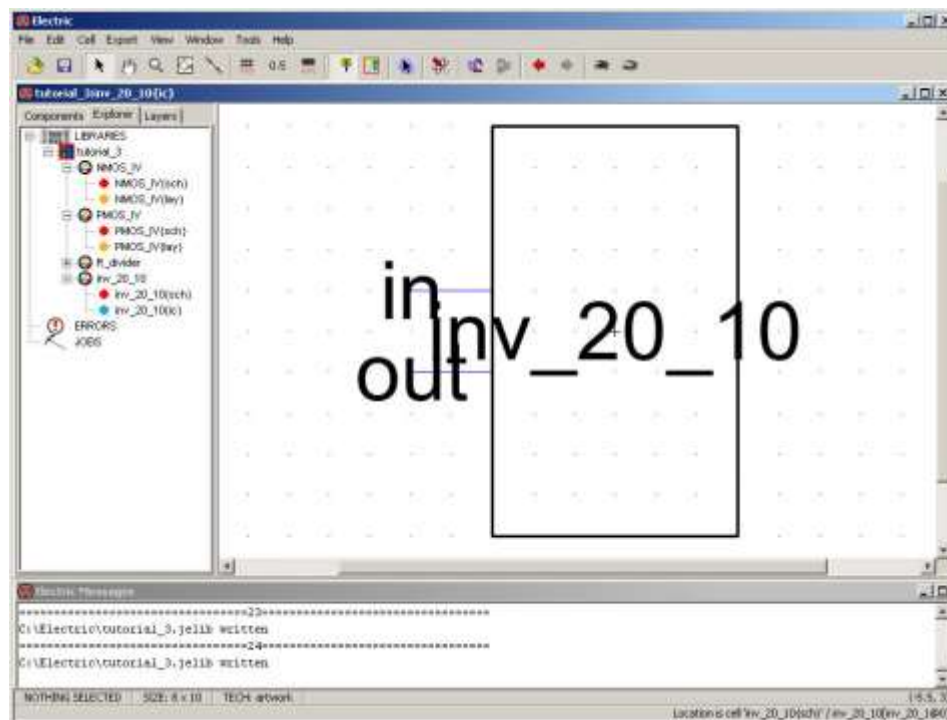
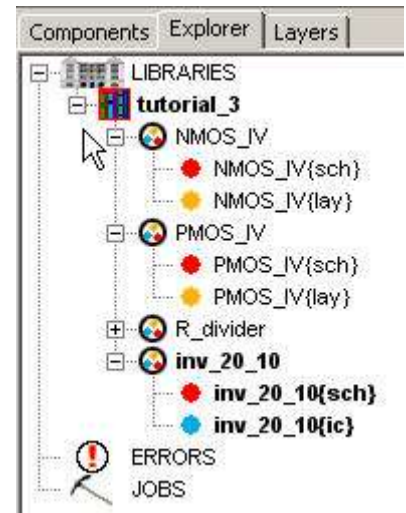


Το προεπιλεγμένο σύμβολο (εικονίδιο) που εμφανίζεται στο σχηματικό είναι ένα αντίγραφο και έχει σχήμα ορθογώνιο οπότε θα πρέπει να το αλλάξουμε ώστε να θυμίζει τον αναστροφέα. Πριν προχωρήσουμε στην αλλαγή του σχήματος κάνουμε κλικ στο tab του Explorer στο αριστερό τμήμα και πατάμε στο «+» του cell της ομάδας inv_20_10 και βλέπουμε να εμφανίζονται με μπλε χρώμα το εικονίδιο (σύμβολο), με κόκκινο το σχηματικό και με πορτοκαλί το layout.

Μπορούμε να ανοίξουμε το icon view κάνοντας διπλό κλικ πάνω στο όνομα ή επιλέγοντας το inv_20_10{ic} και πηγαίνοντας στο μενού

Cell -> Down Hierarchy -> Down Hierarchy (ή απλά πιέζοντας Ctrl+D)

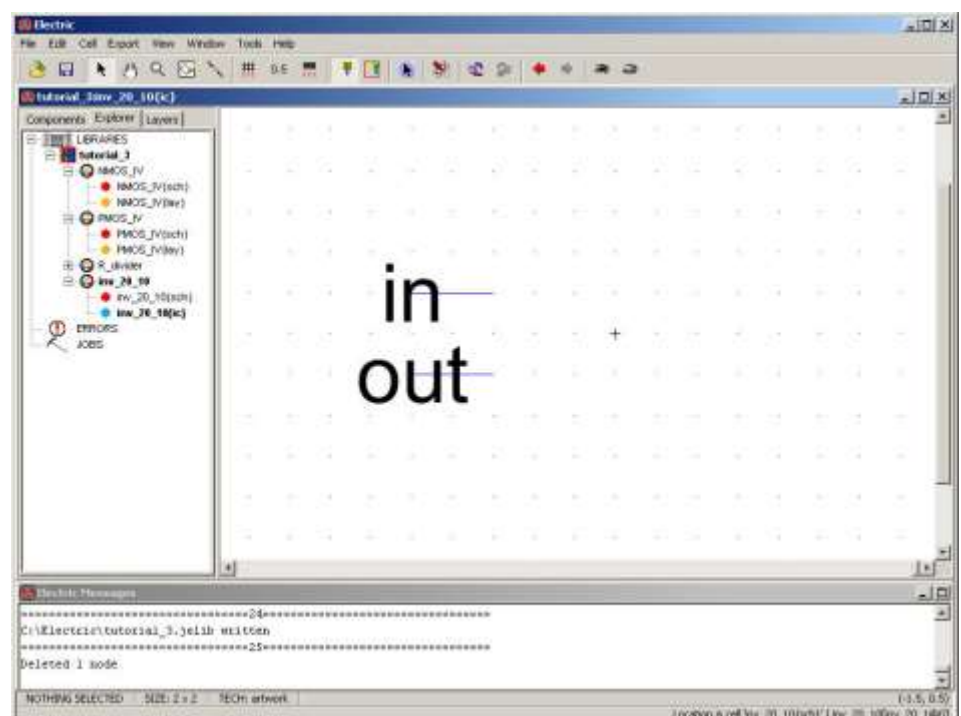
Το σύμβολο που εμφανίζεται στο παράθυρο είναι ως εξής



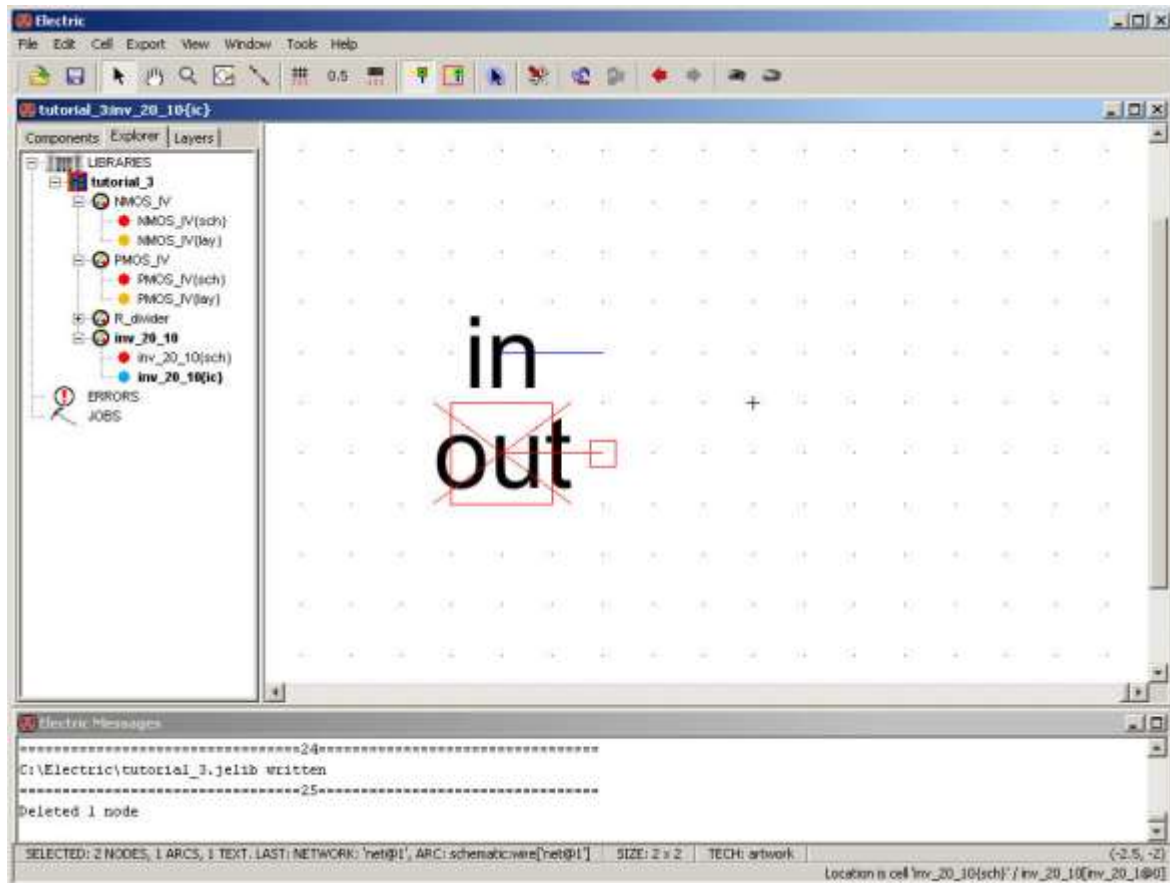
Για να πάμε πίσω στην ιεραρχία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον συνδυασμό Ctrl+U ή να πάμε στο μενού Cell -> Up Hierarchy -> Up Hierarchy.

Πατάμε Ctrl+U να πάμε πίσω στο σχηματικό του αναστροφέα και με επιλεγμένο το icon view πατάμε Ctrl+D για να επιστρέψουμε πάλι στο icon view.

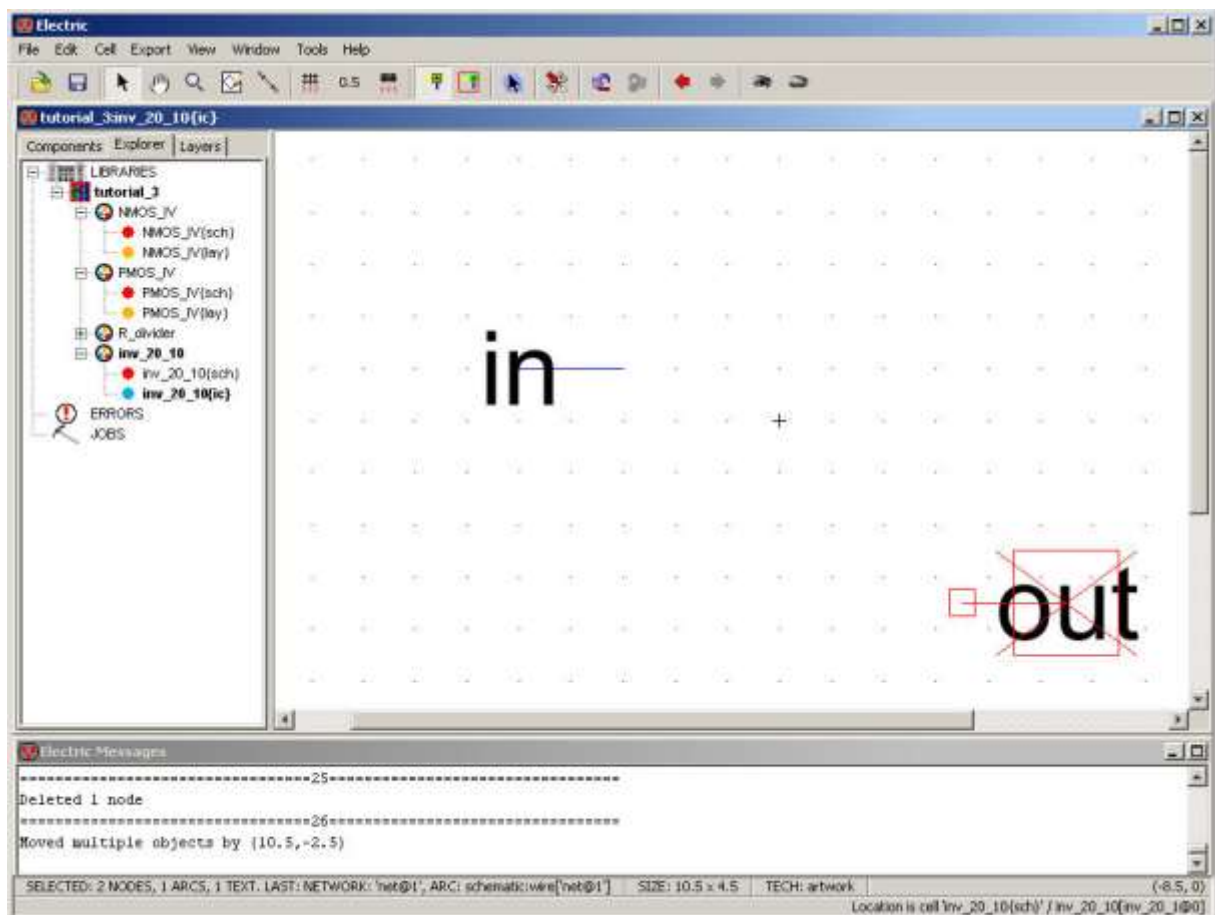
Πρώτα διαγράφουμε το ορθογώνιο (και το κείμενο μαζί) και αυτό που απομένει είναι το εξής:



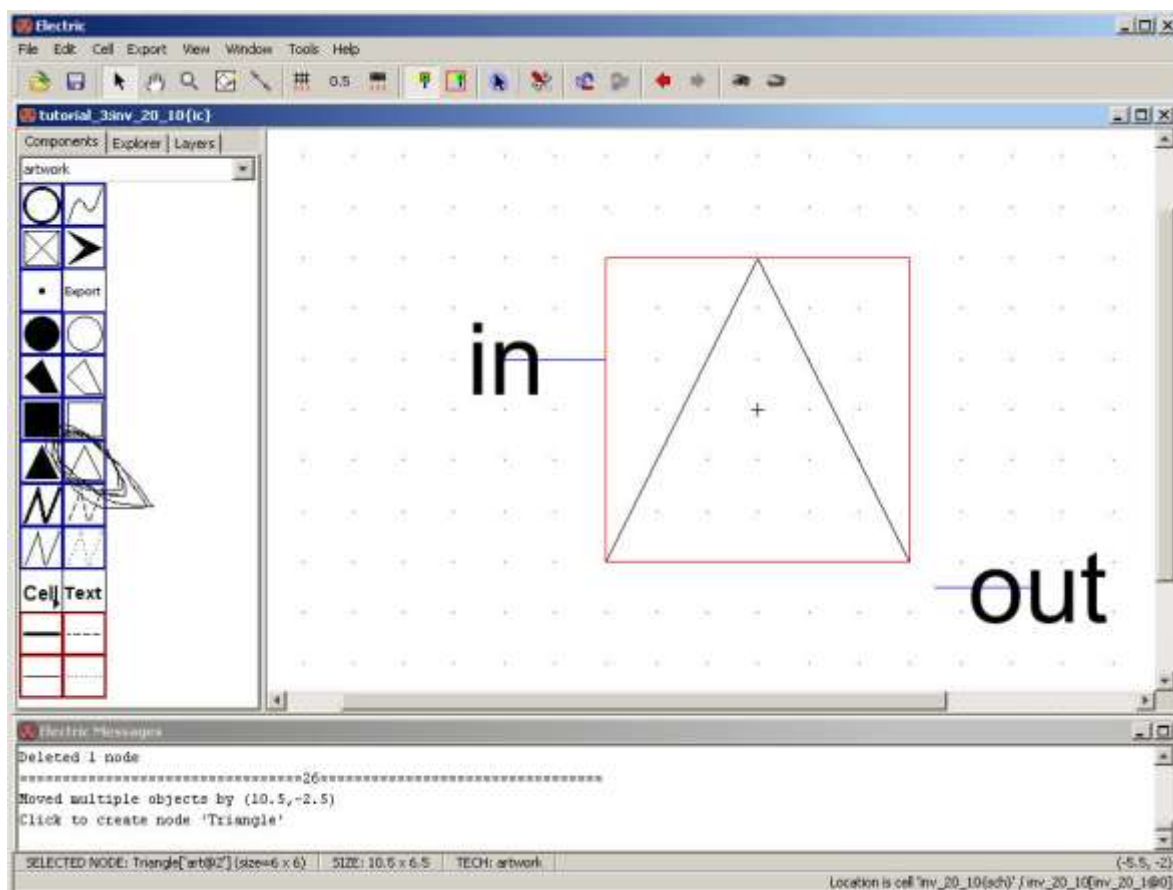
Επιλέγουμε τα δύο κάτω στοιχεία (το out και το καλώδιο) ως εξής:



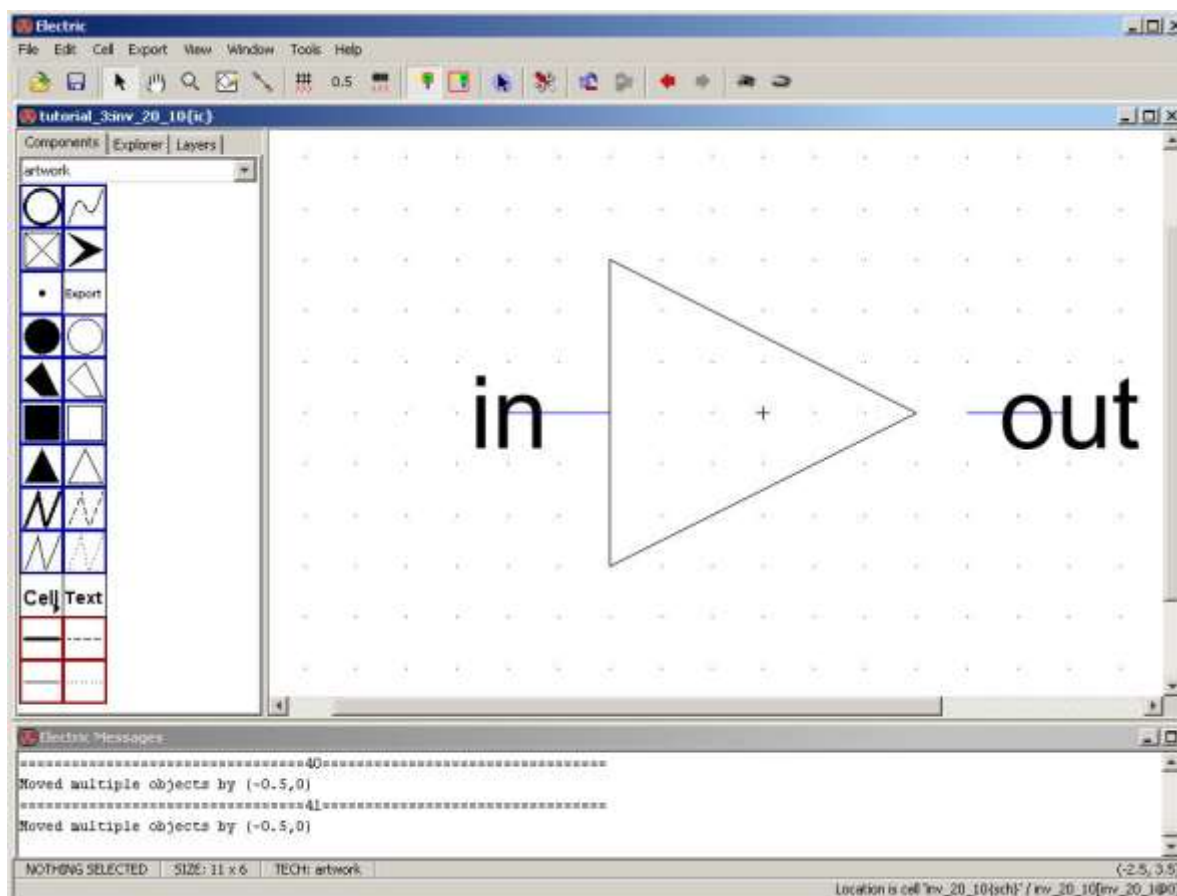
Περιστρέφουμε αυτά τα στοιχεία ώστε να εμφανίζονται σωστά στην έξοδο (ο πιο σύντομος τρόπος για την περιστροφή είναι το Ctrl+J). Στη συνέχεια μετακινούμε ως εξής:



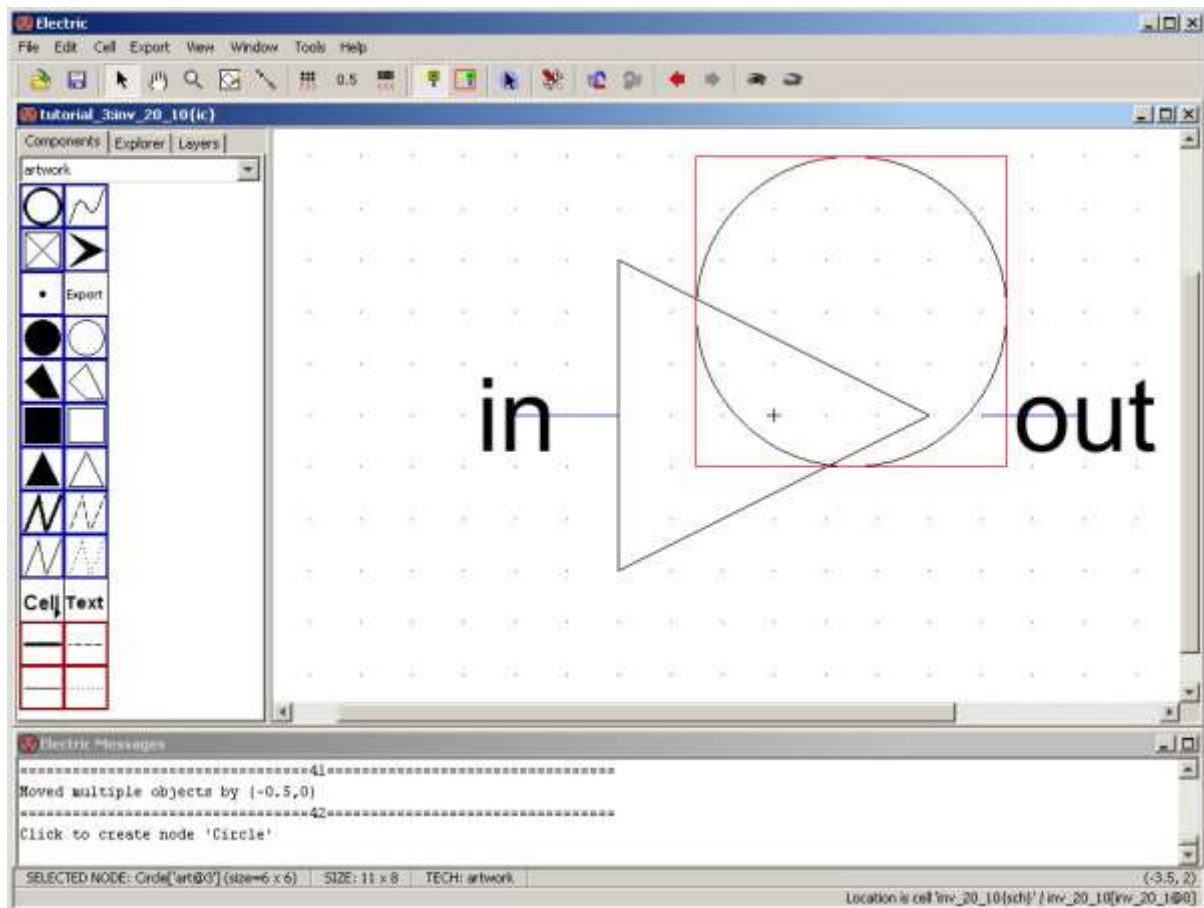
Στη συνέχεια πηγαίνουμε στο μενού Component στο αριστερό τμήμα και επιλέγουμε το τρίγωνο που φαίνεται κυκλωμένο στην παρακάτω εικόνα:



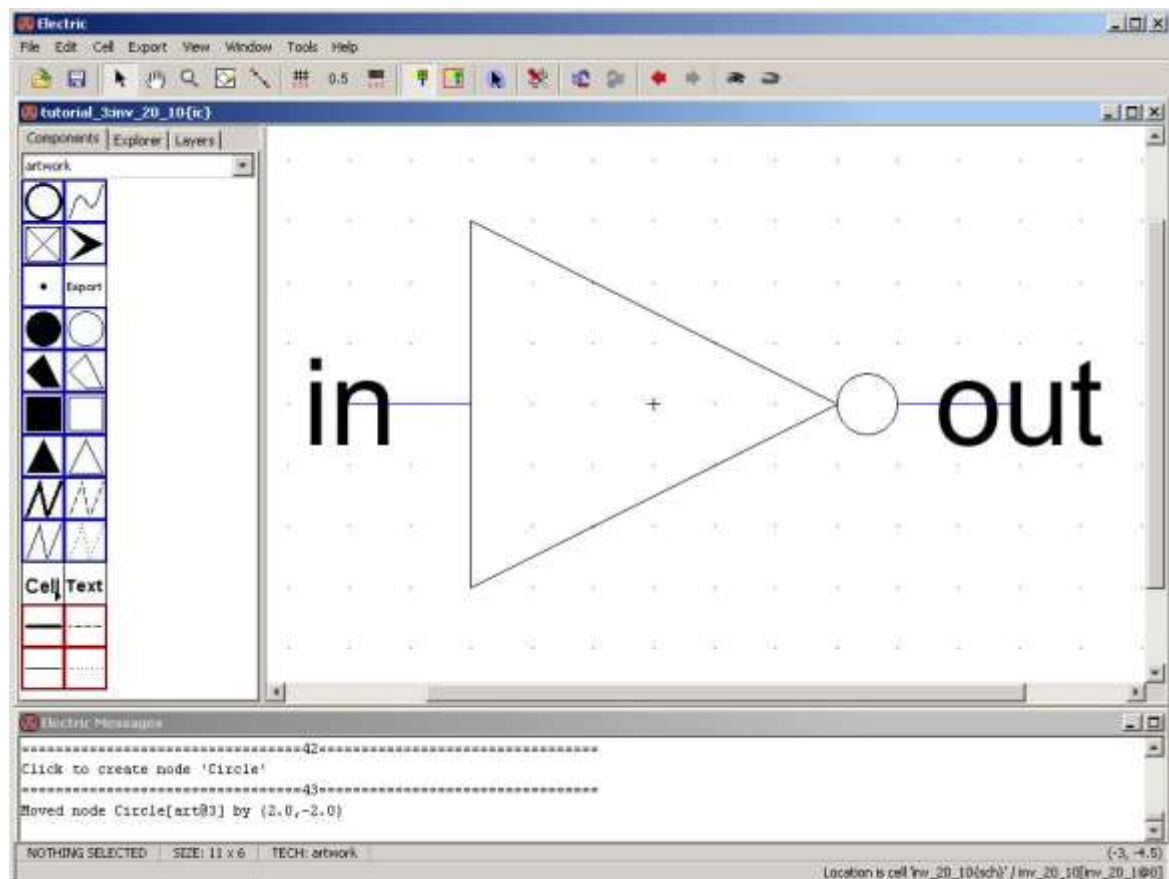
Περιστρέφουμε το τρίγωνο και μετακινούμε τα στοιχεία in/out και τα κείμενα όπως φαίνεται παρακάτω. Να υπενθυμίσουμε ότι με Shift+Click μπορούμε να επιλέξουμε ή να αποεπιλέξουμε ένα στοιχείο.



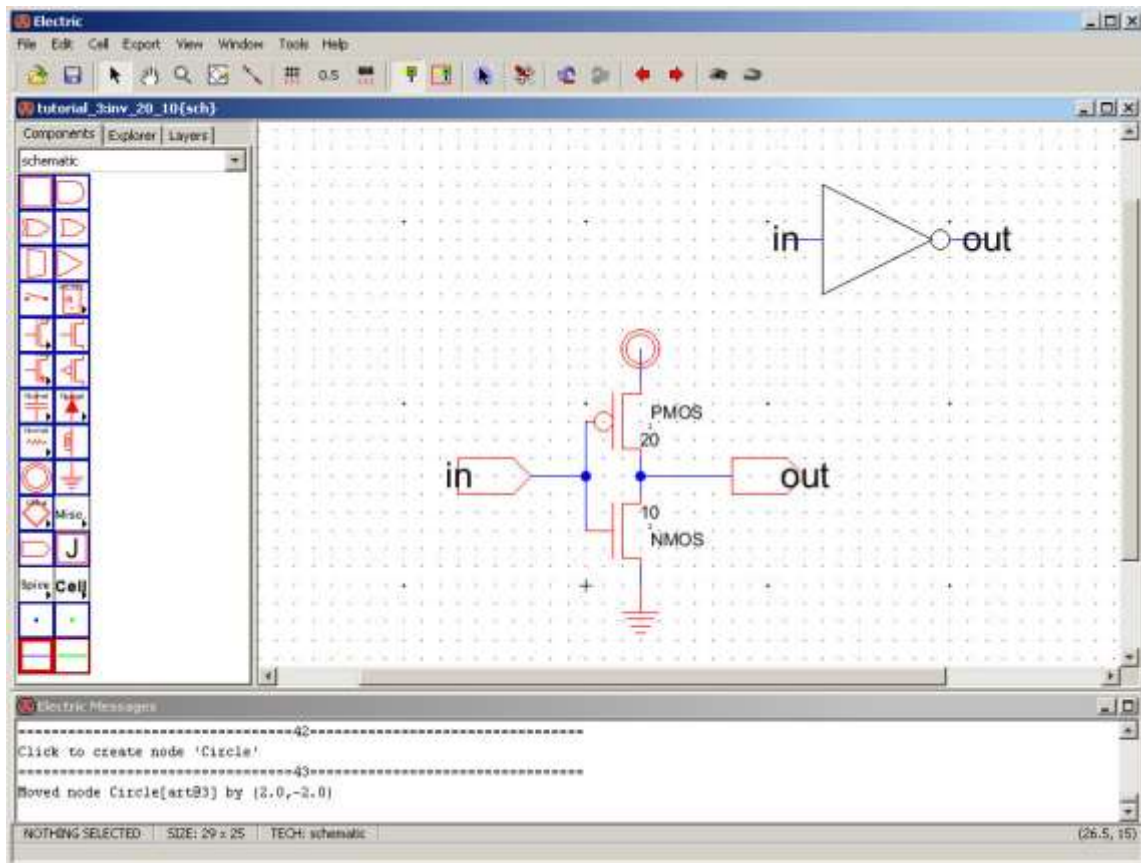
Στη συνέχεια επιλέγουμε τον κύκλο και τον τοποθετούμε στο icon view.



Επεξεργαζόμαστε τις ιδιότητες του κύκλου (Edit the properties ή απλά πατάμε Ctrl+I) για να αλλάξουμε τις διαστάσεις x και y να έχουν τιμή 1. Για να ολοκληρωθεί το icon view τοποθετούμε τον κύκλο όπως φαίνεται παρακάτω:



Πιέζουμε Ctrl+U για να πάμε ένα επίπεδο πάνω στην ιεραρχία, δηλαδή στο σχηματικό του αναστροφέα.

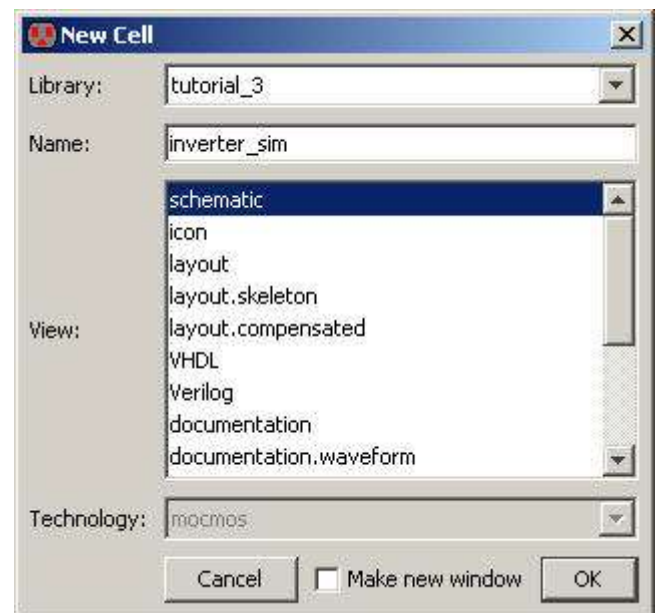


Στη συνέχεια θα προχωρήσουμε στην προσομοίωση του κυκλώματος του αναστροφέα. Για το σκοπό αυτό θα δημιουργήσουμε ένα νέο σχηματικό με την ονομασία `inverter_sim`.

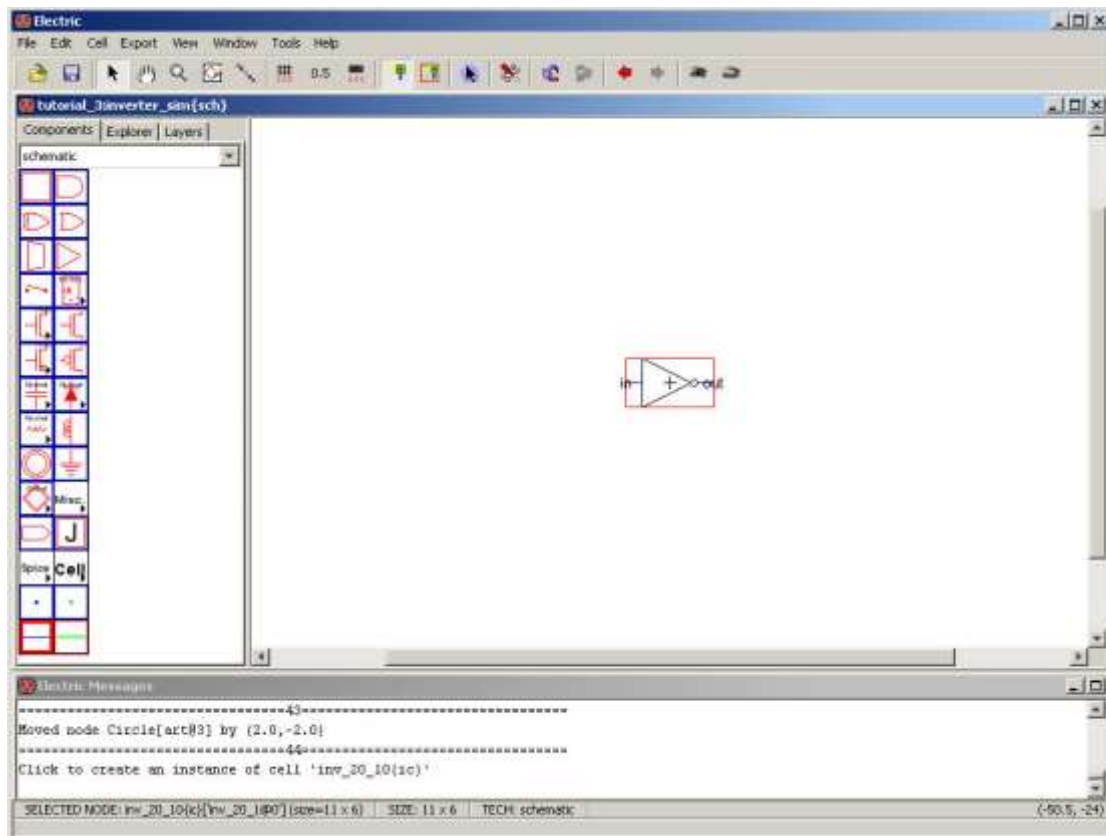
Στο νέο αυτό σχηματικό θα τοποθετήσουμε το σύμβολο (icon) του αναστροφέα που δημιουργήσαμε παραπάνω. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

(α) Στο μενού `Component` στο αριστερό μέρος επιλέγουμε `Cell -> inv_20_10` και

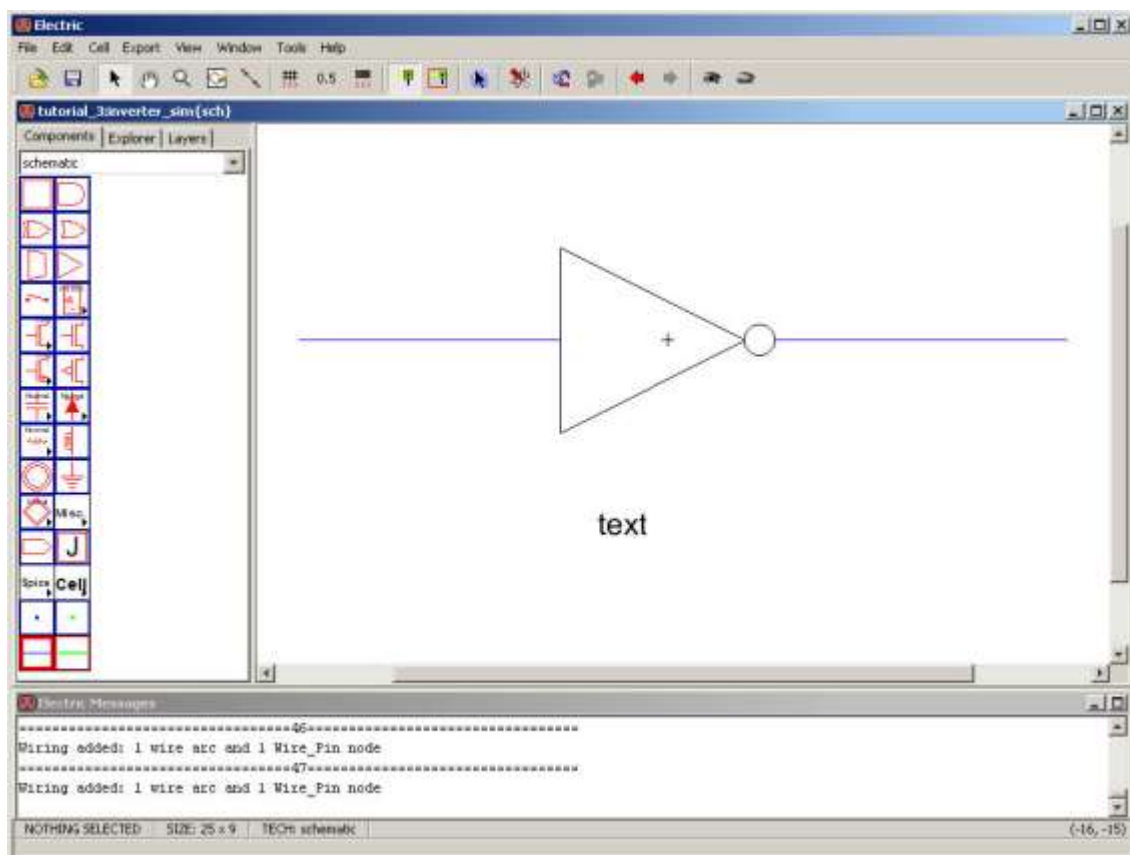
(β) Στον `Explorer`, με πατημένο το κλικ πάνω στο cell που θέλουμε να τοποθετήσουμε, κάνουμε `drag and drop` πάνω στο σχηματικό.



Μετά την τοποθέτηση του συμβόλου του αναστροφέα το νέο σχηματικό θα είναι ως εξής:

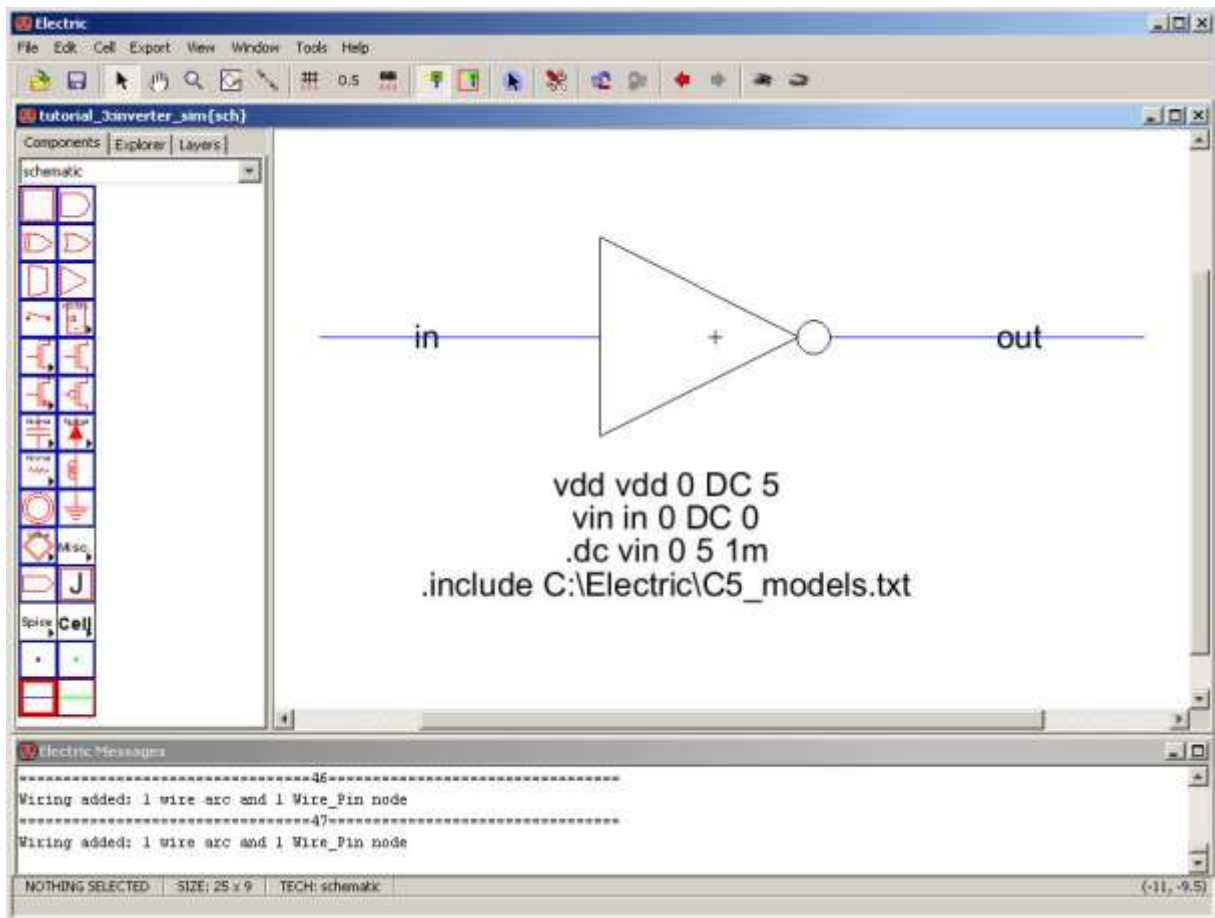


Προσθέτουμε καλώδια (wire Arcs) στην είσοδο και την έξοδο του συμβόλου και στη συνέχεια προσθέτουμε κώδικα SPICE κάνοντας κλικ στο βελάκι του Misc. με το αποτέλεσμα να είναι ως εξής:

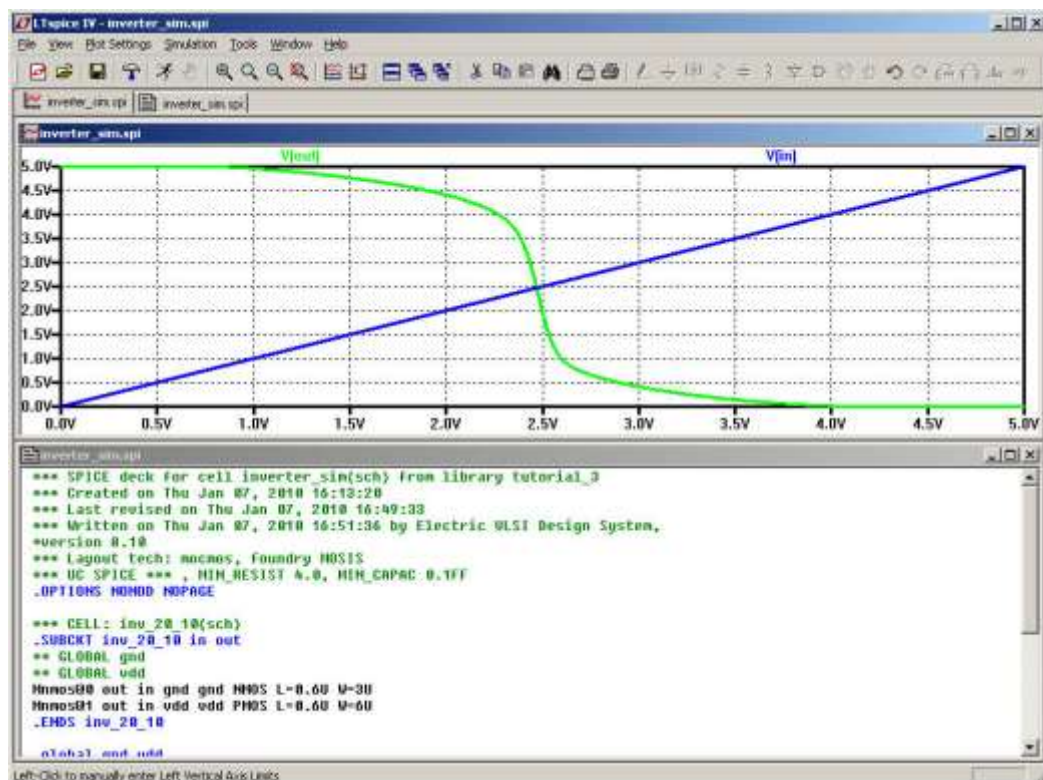


Στη συνέχεια κάνουμε διπλό κλικ πάνω στα Arcs (τα καλώδια - wires) για να τοποθετήσουμε labels **in** και **out** (εναλλακτικά μπορούμε να επιλέξουμε το καλώδιο και να πληκτρολογήσουμε Ctrl+I) όπως φαίνεται παρακάτω και συμπληρώνουμε τον κώδικα SPICE (set to Multi-line text) που φαίνεται παρακάτω. Προσοχή στο **path**, να αντικατασταθεί με τη σωστή διαδρομή χωρίς κενά.

```
vdd vdd 0 DC 5
vin in 0 DC 0
.dc vin 0 5 1m
.include C:\Users\sotos\Desktop\electric\C5_models.txt
```



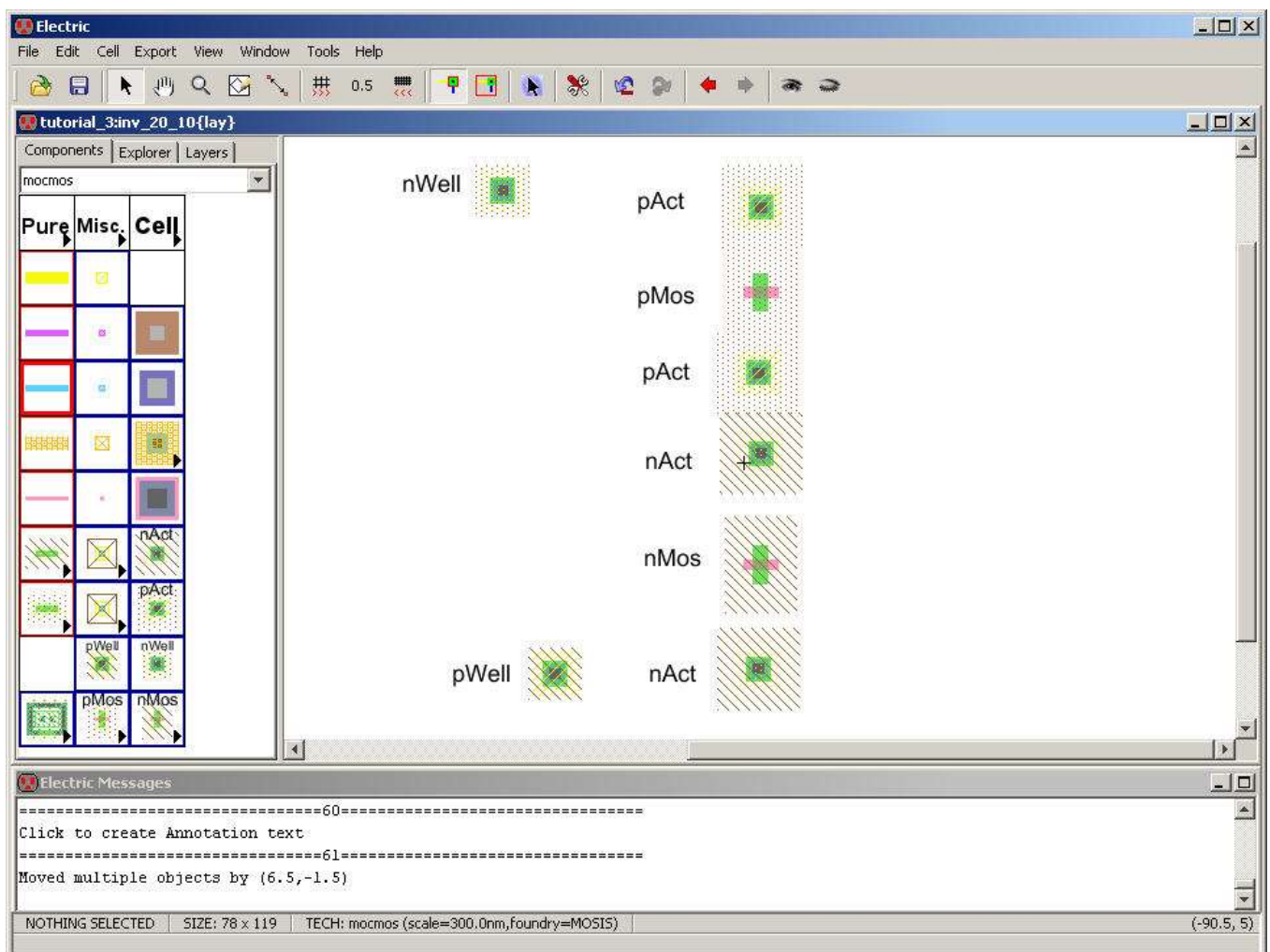
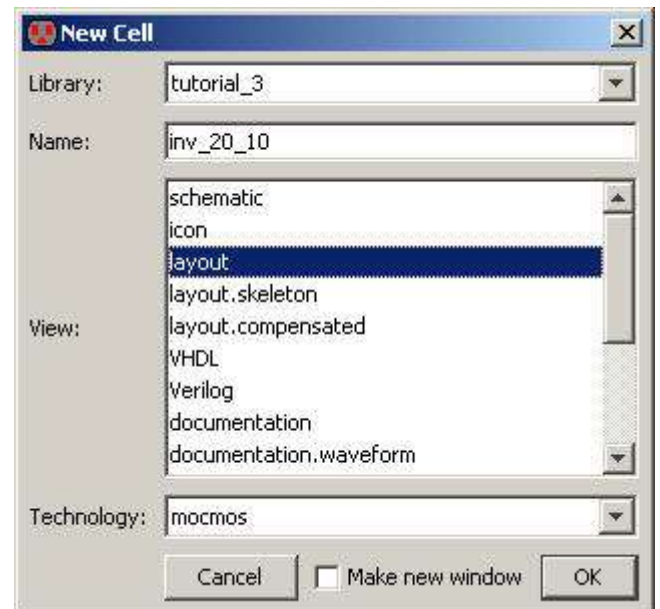
Προσομοιώνουμε με την εντολή: Tools -> Simulation (Spice) -> Write Spice Deck και τα αποτελέσματα στο LTspice είναι τα εξής (αν επιλέξουμε τις τάσεις in και out):



Στη συνέχεια θα προχωρήσουμε στη σχεδίαση του layout του αναστροφέα. Αρχικά θα δημιουργήσουμε ένα νέο view του αναστροφέα (layout view), όπως φαίνεται στην διπλανή εικόνα .

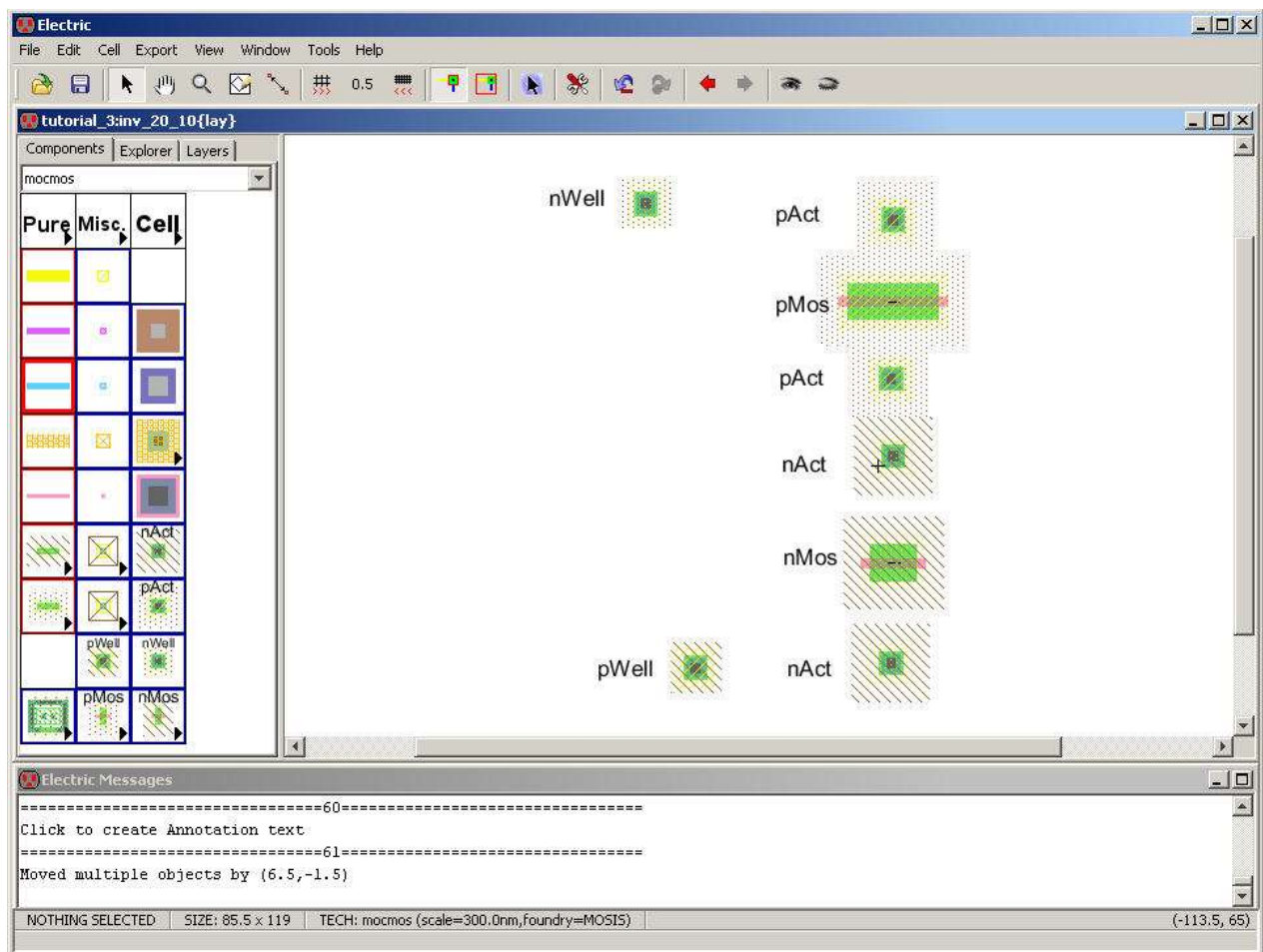
Τώρα θα πρέπει να υπάρχουν τρία views στην ομάδα cell του inv_20_10, το σχηματικό, το σύμβολο (icon) και το layout.

Στο νέο cell θα προσθέσουμε τα Nodes που φαίνονται παρακάτω. Το κείμενο δίπλα στα Nodes έχει τοποθετηθεί για να καθοδηγεί αυτές τις τοποθετήσεις.

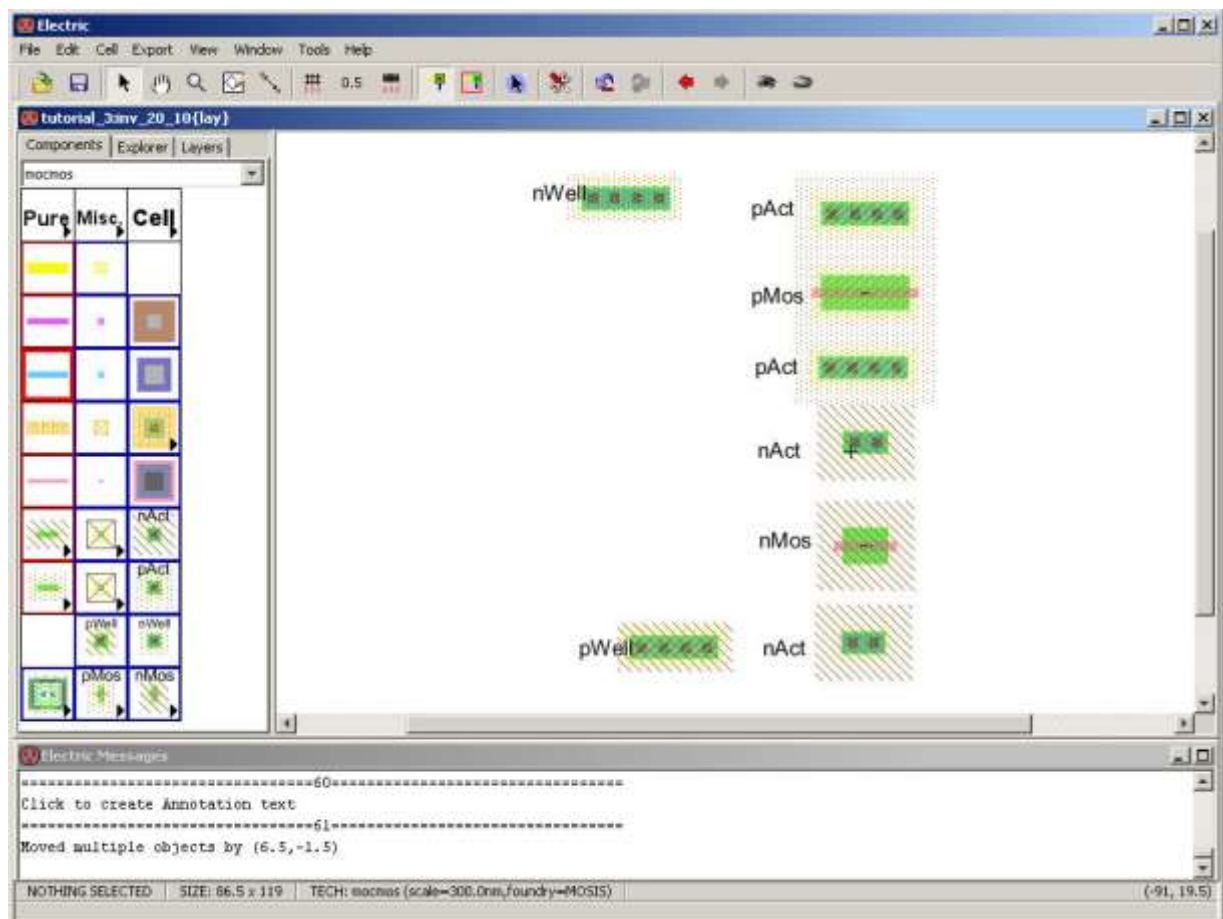


Στη συνέχεια επιλέγουμε το pMos Node και ορίζουμε το μοντέλο SPICE να έχει την τιμή «PMOS», όπως έγινε στο δεύτερο εργαστήριο (Tutorial 2) και επίσης θέτουμε το πλάτος του να έχει την τιμή w=20.

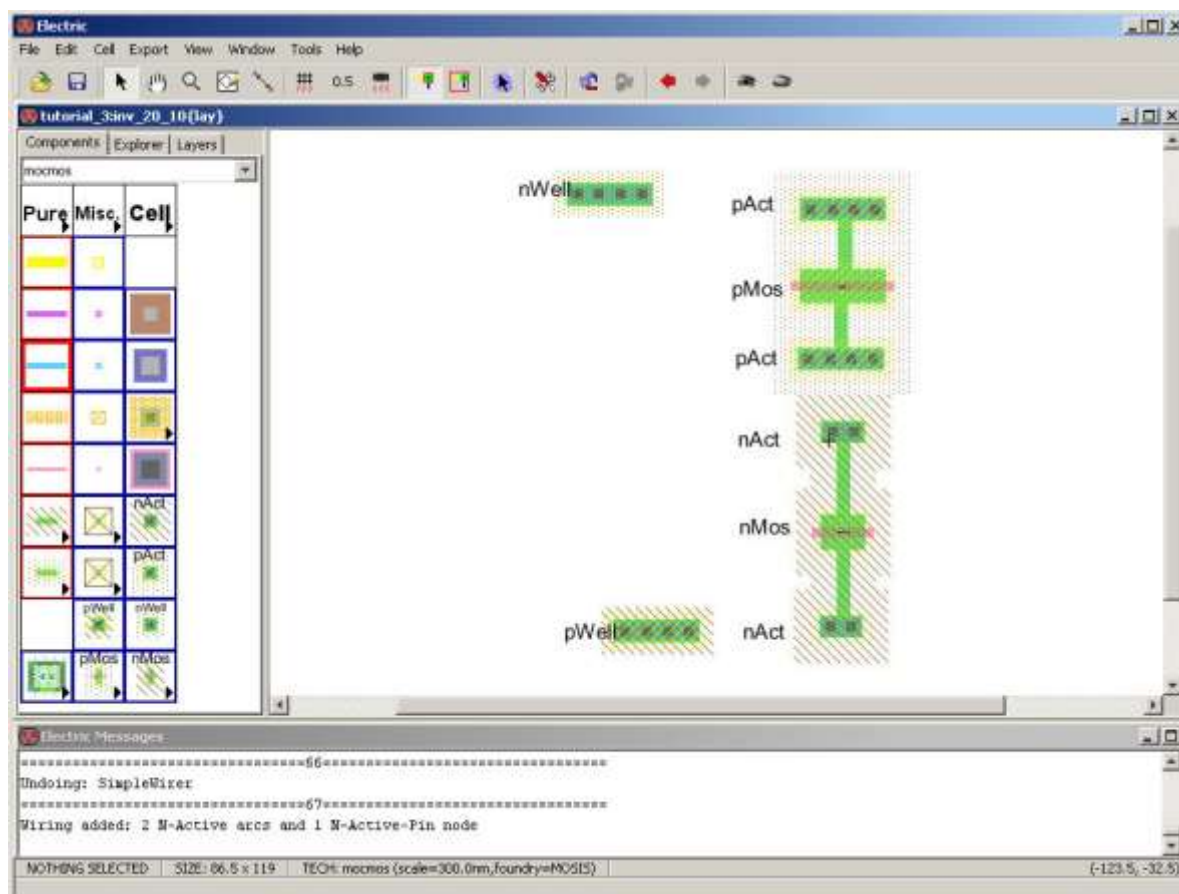
Όμοια επιλέγουμε το nMos Node και ορίζουμε το μοντέλο SPICE να έχει την τιμή «NMOS» και το πλάτος να έχει την τιμή 10. Και τα δύο MOSFET έχουν μήκος L=2.



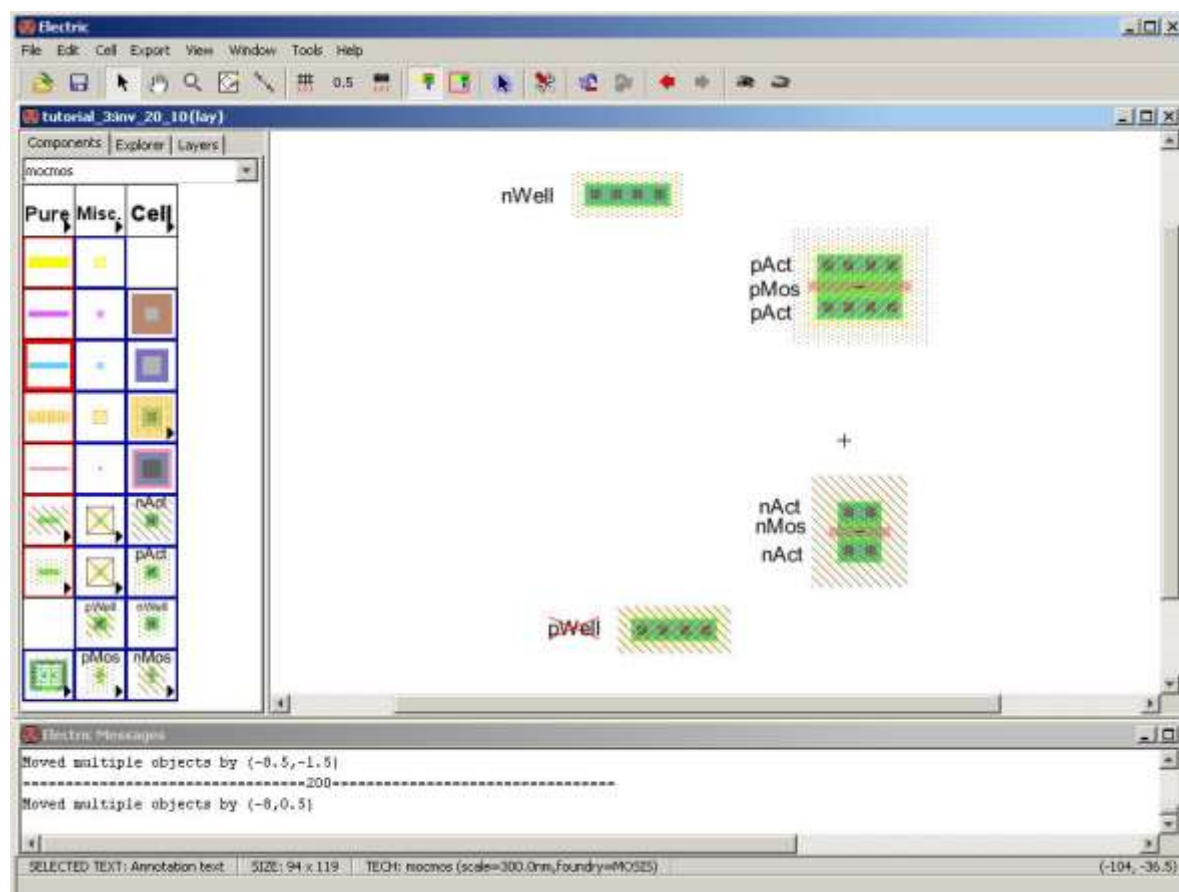
Στη συνέχεια θέτουμε την πλευρά x να έχει τιμή 20 και στα δύο pAct Nodes και όμοια στα nAct Nodes να έχει τιμή 10. Επίσης θέτουμε την πλευρά x του pWell καθώς και του nWell να έχει την τιμή 20



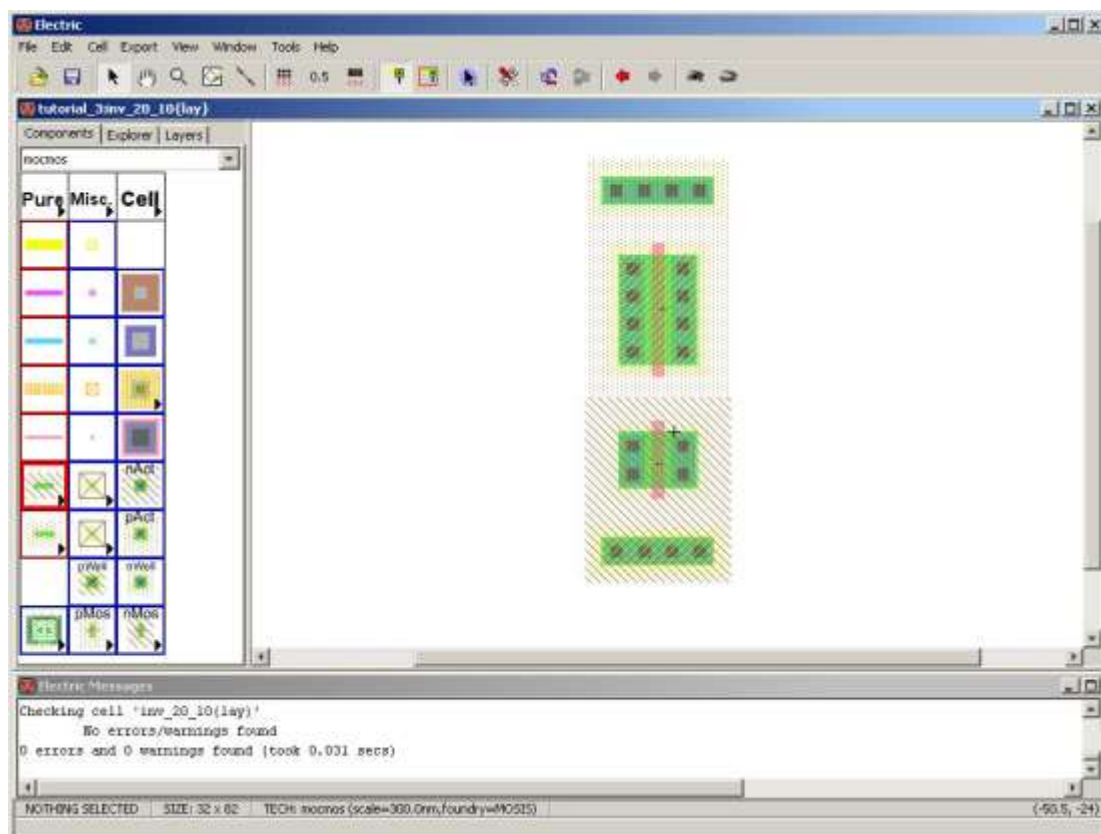
Στη συνέχεια προσθέτουμε Arcs μεταξύ των τρανζίστορ και των ενεργών περιοχών (active areas), όπως φαίνεται παρακάτω:



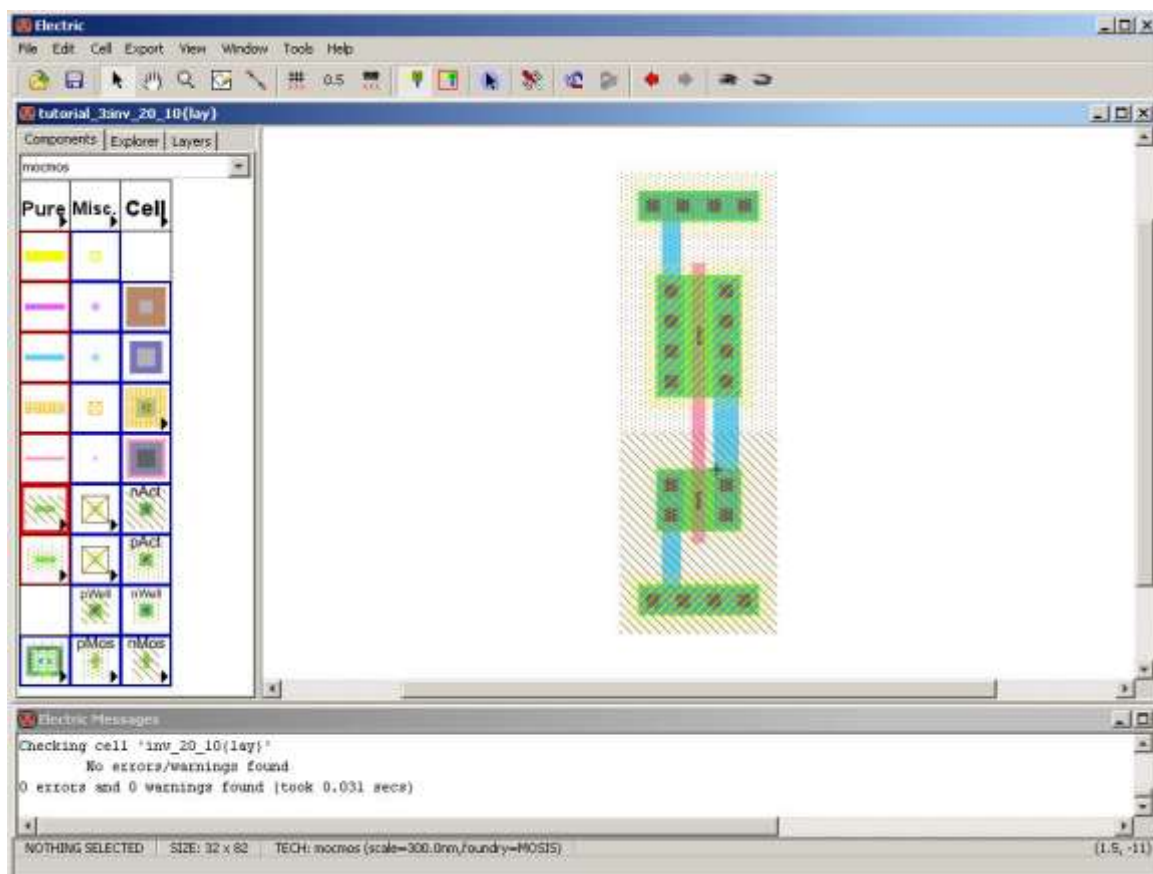
Στη συνέχεια μετακινούμε τις ενεργές περιοχές (active areas) ώστε να πλησιάσουν στα τρανζίστορ. Μετακινούμε επίσης και τα κείμενα (Annotation text) ώστε να βρίσκονται δίπλα τους



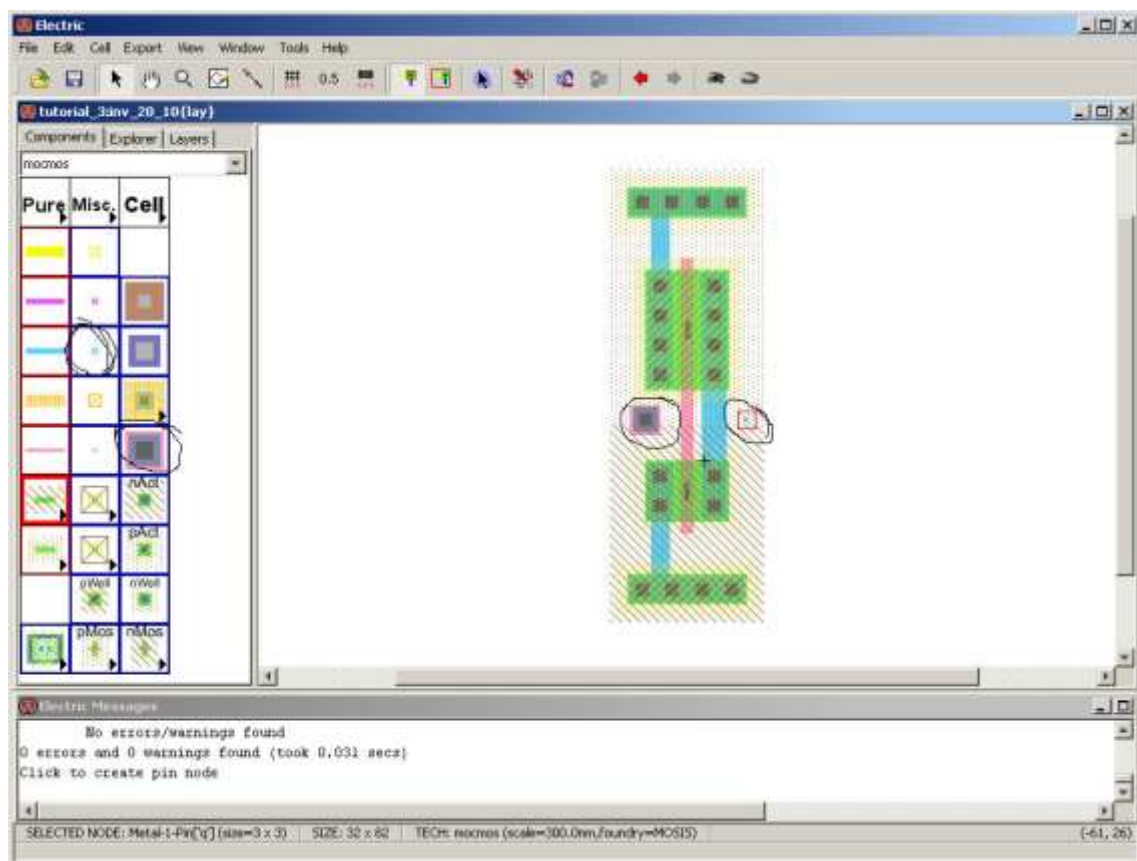
Σε αυτό το σημείο τα κείμενα μπορούν να διαγραφούν. Περιστρέφουμε τα τρανζίστορ και τις ενεργές περιοχές και μετακινούμε ώστε να πλησιάσουν μεταξύ τους όπως φαίνεται παρακάτω:



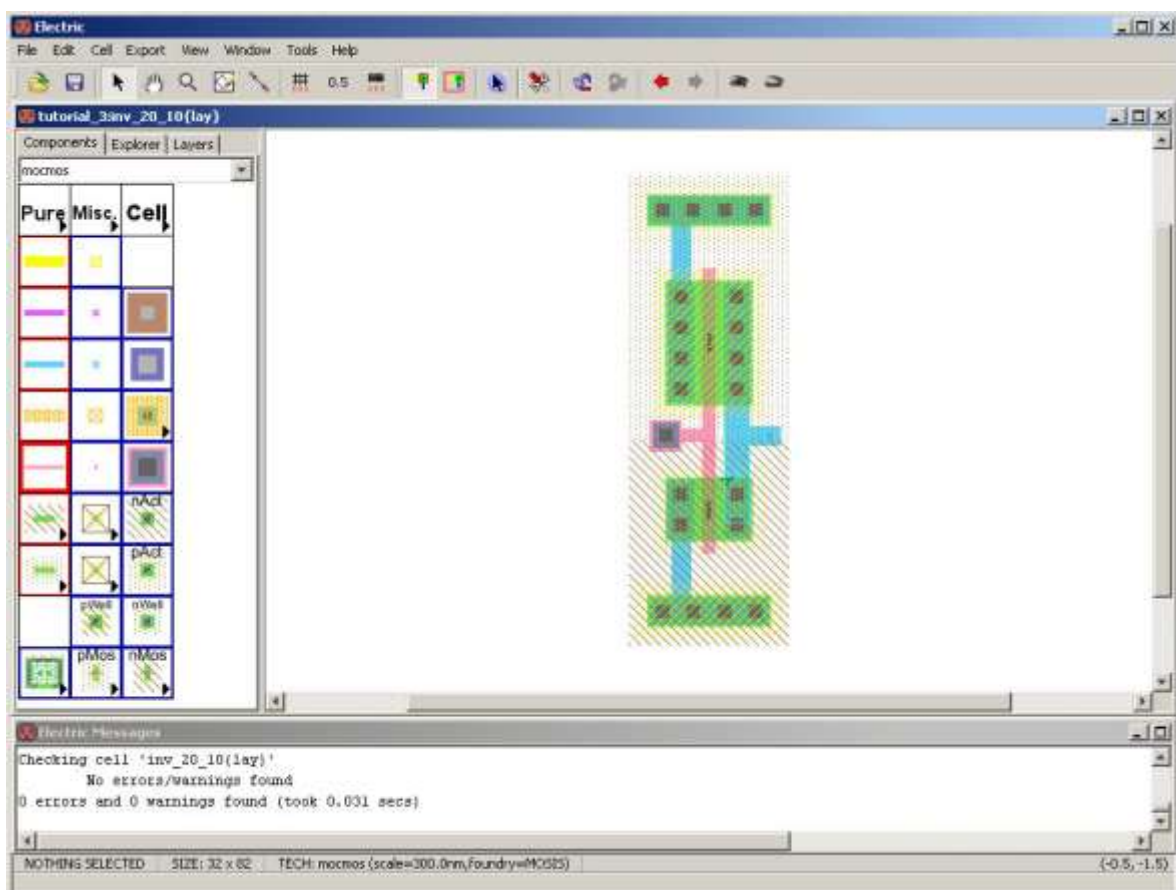
Ένας έλεγχος DRC στο layout δεν θα πρέπει να εμφανίζει κανένα λάθος διαφορετικά θα πρέπει να διορθωθεί. Συνδέουμε τα δύο poly μεταξύ τους για να συνδεθούν οι δύο πύλες, συνδέουμε επίσης τα μέταλλα μεταξύ τους στην δεξιά πλευρά και τέλος τα μέταλλα αριστερά τα συνδέουμε πάνω ή κάτω στο πηγάδι (well) όπως φαίνεται παρακάτω. Κάνουμε έλεγχο DRC για να δούμε αν υπάρχει λάθος.



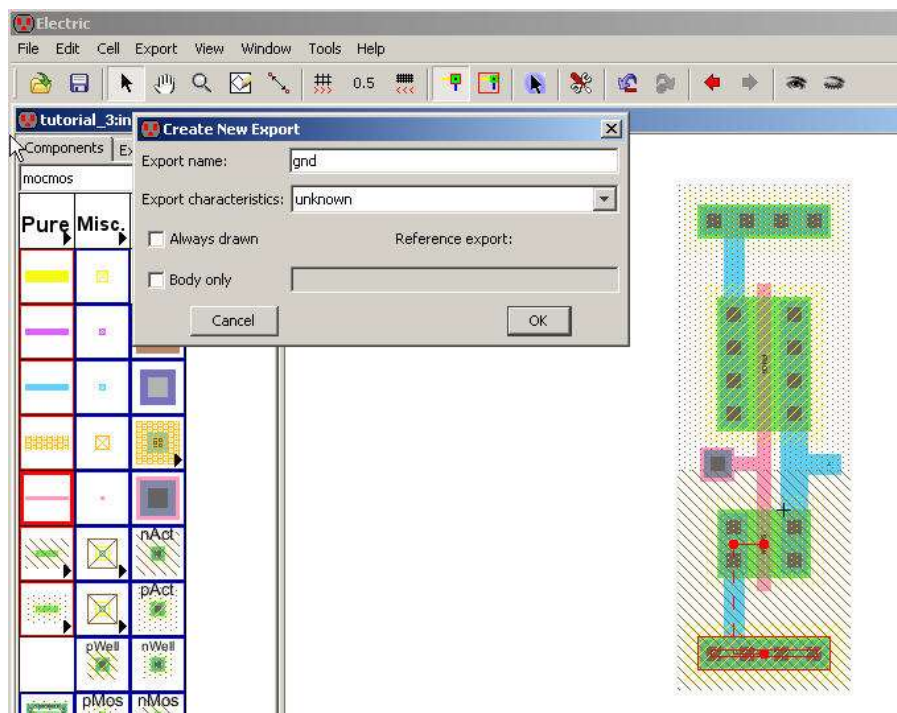
Στη συνέχεια προσθέτουμε αριστερά ένα contact μεταξύ μετάλλου και poly (poly1 to metal1 contact) και ένα ακροδέκτη μετάλλου1 (metal1 Pin) στο δεξί μέρος, όπως φαίνεται παρακάτω:



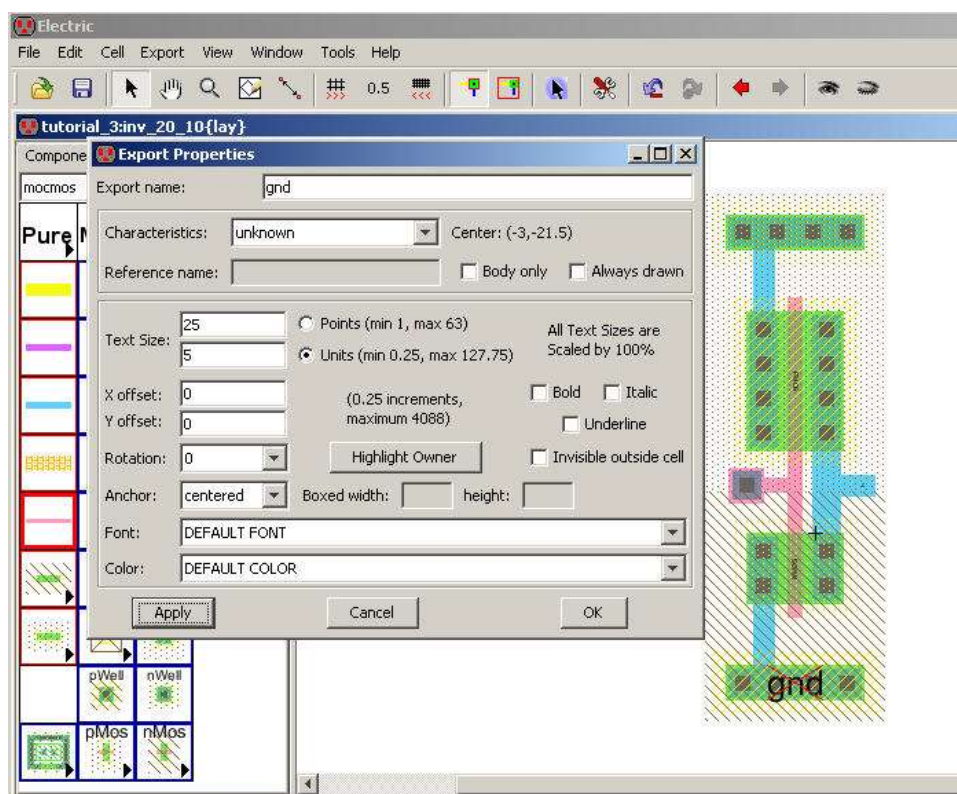
Συνδέουμε το Pin και στη συνέχεια το Contact όπως φαίνεται παρακάτω. Αν το πλάτος του poly δεν είναι 2 μετά την σύνδεση με το Arc τότε από τις ιδιότητες το αλλάζουμε ώστε να έχει την τιμή 2. Στη συνέχεια εκτελούμε έλεγχο DRC για να επαληθεύσουμε ότι το σχέδιο δεν έχει λάθη.



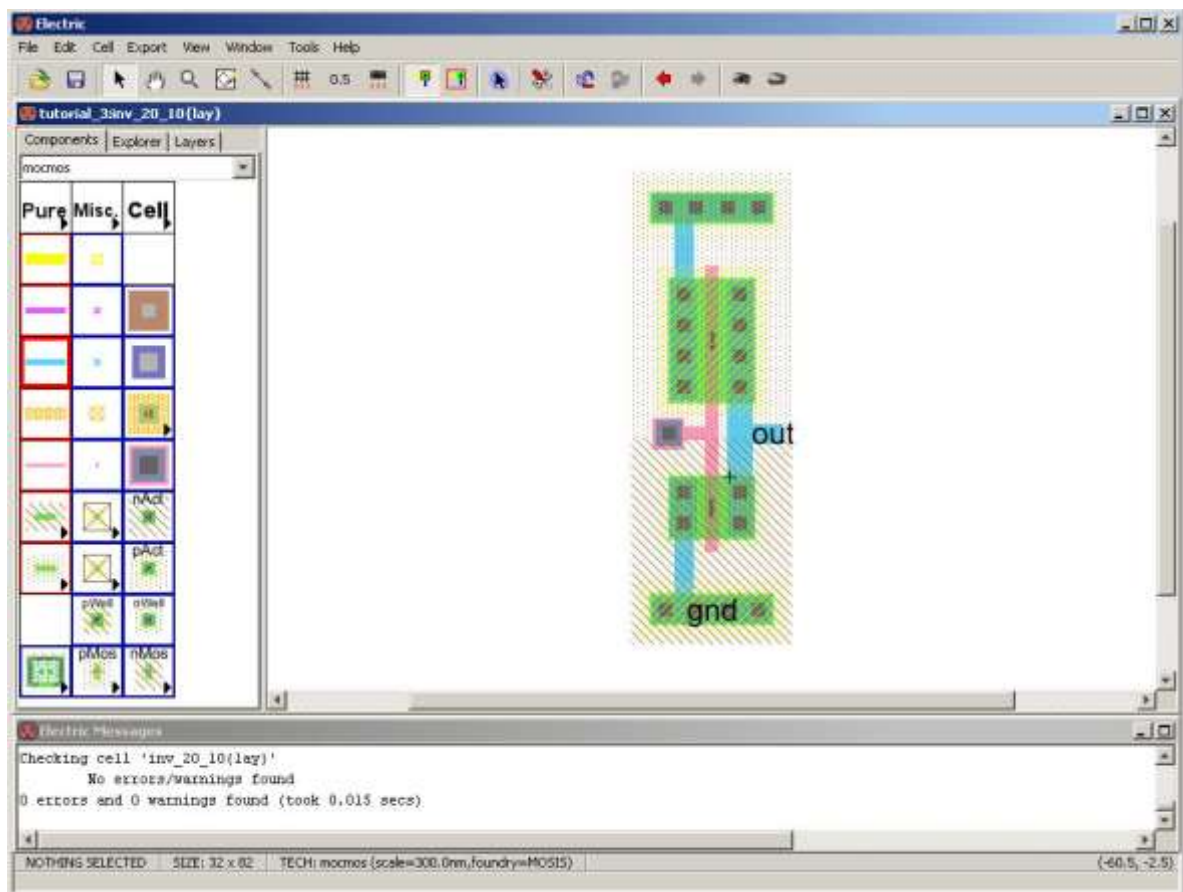
Το επόμενο βήμα είναι το Export στην τροφοδοσία, στην είσοδο και στην έξοδο (gnd, vdd, in and out). Επιλέγουμε το Node pWell και πληκτρολογούμε Ctrl+E και στο παράθυρο συμπληρώνουμε όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



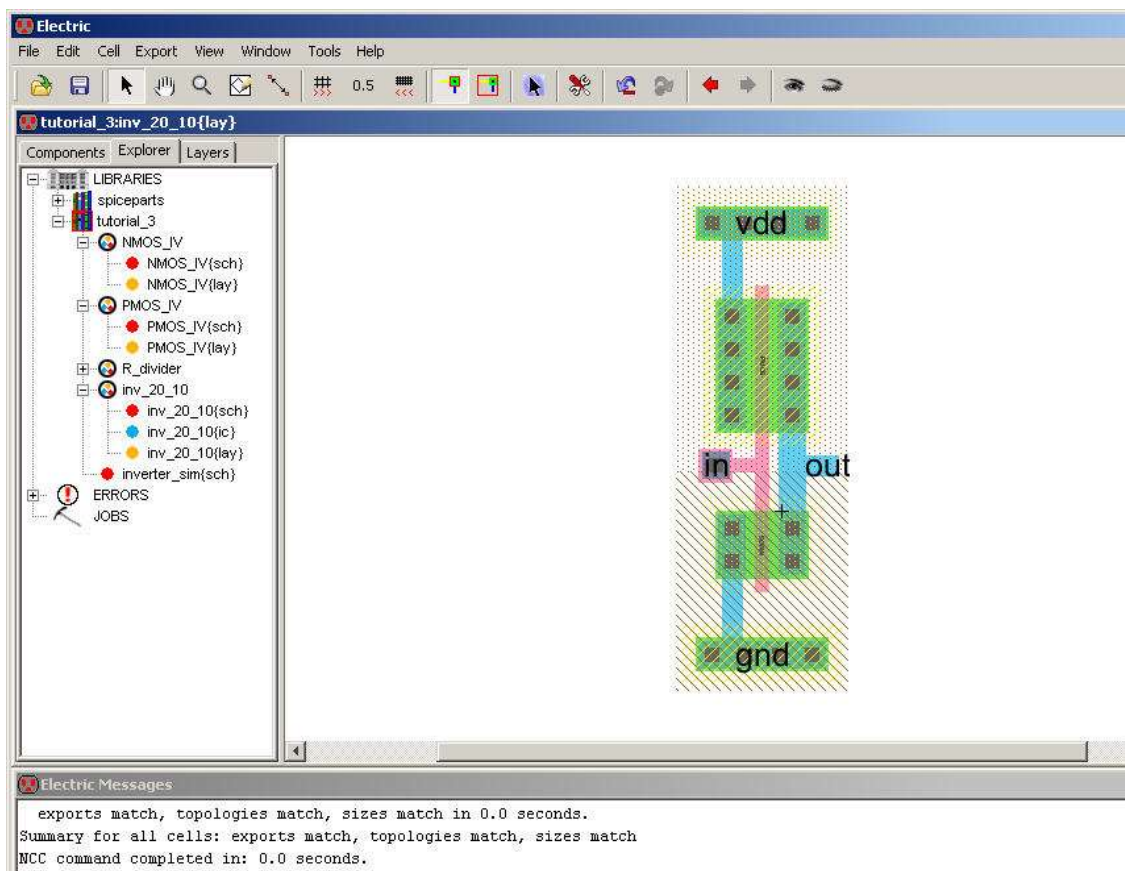
Θα χρειαστεί να αλλάξουμε το μέγεθος της γραμματοσειράς από το gnd Export από την αρχική τιμή στην τιμή 5, όπως φαίνεται παρακάτω. Να υπενθυμίσουμε τα εξής: (α) πως με Ctrl+click εναλλάσσουμε κυκλικά τα αντικείμενα που επιλέγουμε και (β) δεν χρησιμοποιούμε κεφαλαία γράμματα στην ονομασία στο Export του gnd ή του vdd για να είναι σε συμφωνία με το σχηματικό και να περνά με επιτυχία τον έλεγχο NCC



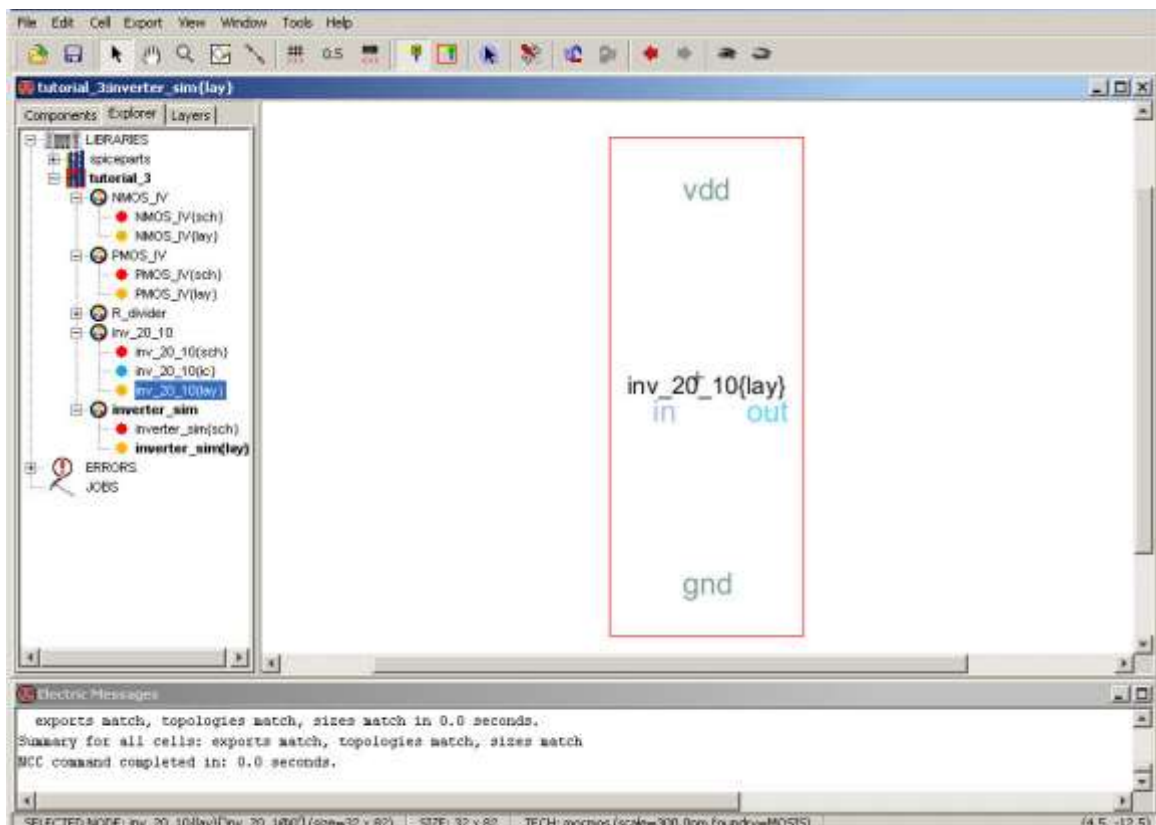
Θα επαναλάβουμε το Export στο metal1 Pin που τοποθετήσαμε στην έξοδο (το Export μπορεί να γίνει μόνο σε Nodes και το Pin είναι Node). Θα κάνουμε Export δίνοντας το όνομα out όπως είναι στο σχηματικό και αλλάζουμε στη συνέχεια το μέγεθος της γραμματοσειράς σε 5, όπως φαίνεται παρακάτω:



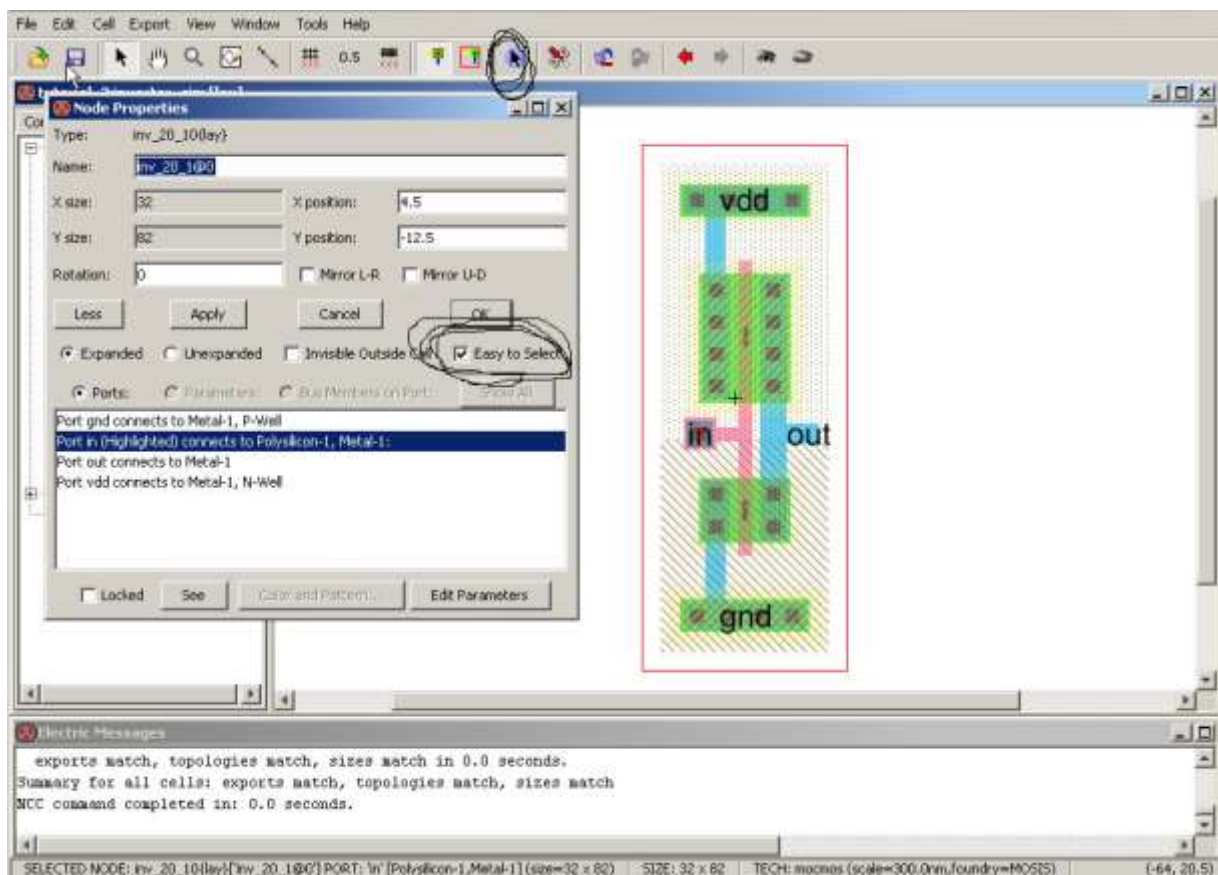
Επαναλαμβάνουμε το Export στα vdd και στο in και στη συνέχεια εκτελούμε ελέγχους DRC, NCC και Well Check στο τελικό layout. Για να συνεχίσουμε στην προσομοίωση δεν θα πρέπει να βρεθεί κανένα λάθος.



Για την προσομοίωση δημιουργούμε ένα νέο cell με την ονομασία inverter_sim επιλέγοντας layout view. Στο περιβάλλον του Explorer κάνουμε Drag and Drop το inv_20_10{lay} στην περιοχή σχεδίασης του inverter_sim όπως φαίνεται παρακάτω:

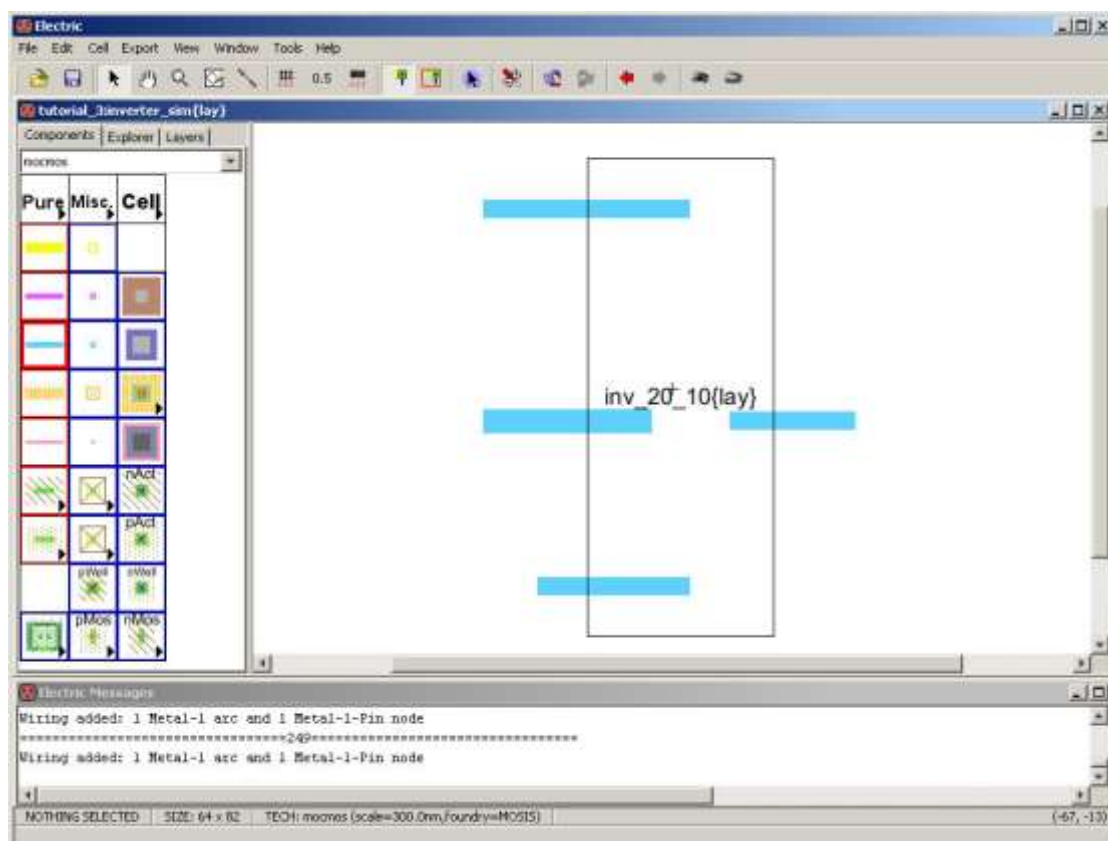


Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί πως όταν χρησιμοποιούμε με αυτό τον τρόπο τα cell από μια βιβλιοθήκη δεν μπορούμε να δούμε στο εσωτερικό του cell αλλά μπορούμε **μόνο** να δούμε τα **Exports**. Επιλέγουμε το cell και κάνουμε κλικ στο «μάτι» και στο «κλειστό μάτι» (και τα δύο εικονίδια βρίσκονται στο μενού στην γραμμή εργαλείων στα δεξιά) για να βλέπουμε ή να μην βλέπουμε το εσωτερικό του cell. Με επιλεγμένο το cell πατάμε Ctrl+I (edit properties) και ρυθμίζουμε όπως παρακάτω:

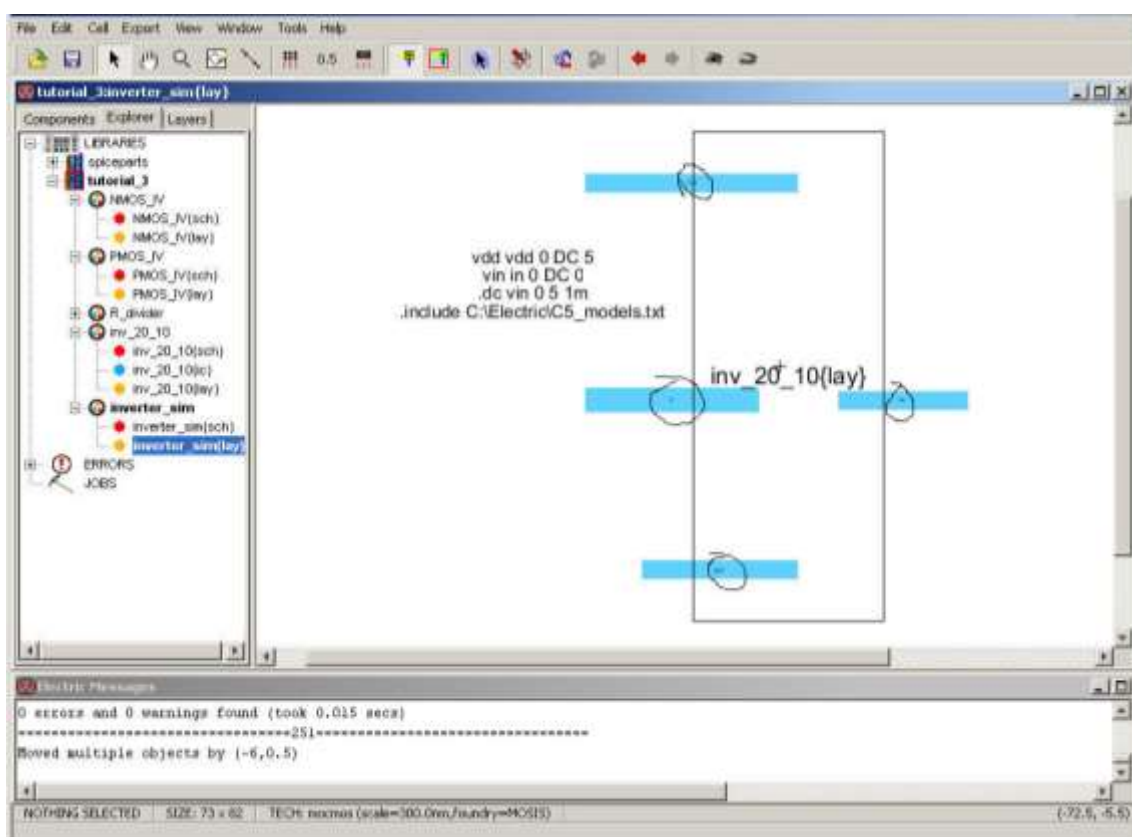


Στο παραπάνω παράθυρο μπορούμε να αποεπιλέξουμε την επιλογή: “Easy to Select” πράγμα που διευκολύνει την σχεδίαση σε σύνθετα layout. Στην περίπτωση που ένα cell ή ένα layout είναι «δύσκολο»

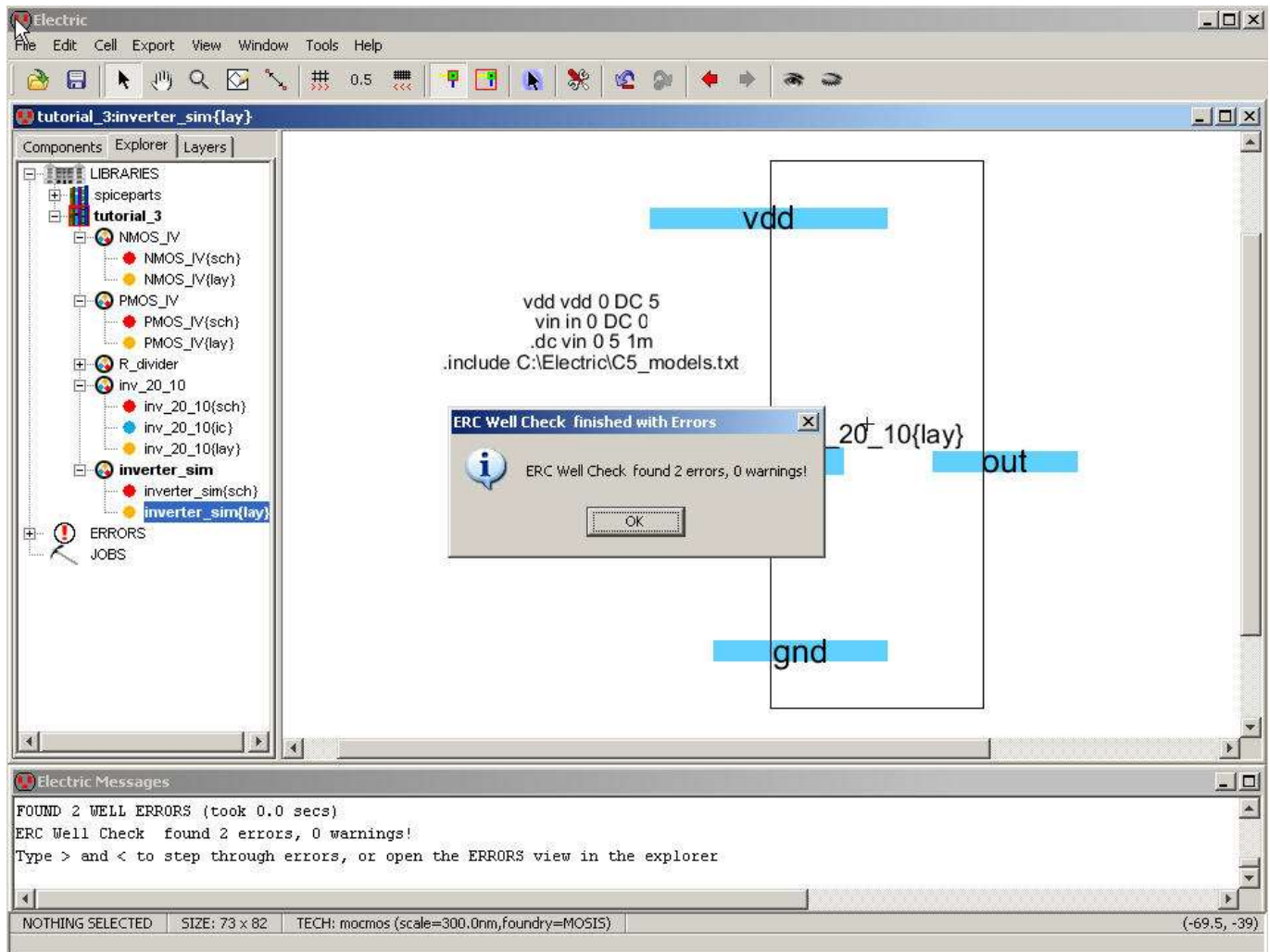
να το επιλέξουμε κάνουμε κλικ στο μενού τον κέρσσορα “Special Select” που φαίνεται κυκλωμένος στην παραπάνω εικόνα. Στη συνέχεια θα συνδέσουμε καλώδια από μέταλλο1 και στα 4 ports όπως παρακάτω:



Στη συνέχεια αλλάζουμε τις ονομασίες από τα wire Arcs για να αντιστοιχούν με τα ονόματα του inverter_sim{sch}. Επειδή είναι δύσκολο να φανούν τα ονόματα των wire Arcs αλλάζουμε το μέγεθος σε 5 (είναι χρήσιμο στην επιλογή το Ctrl+click και το Shift+click). Για την προσομοίωση αντιγράφουμε τον κώδικα SPICE από τον inverter_sim{sch} στο layout view και αυξάνουμε το μέγεθος της γραμματοσειράς ώστε να είναι εμφανής



Αν δοκιμάσουμε να πραγματοποιήσουμε ελέγχους DRC, NCC και Well Check στο cell inverter_sim θα δούμε ότι βρίσκει λάθη και στο NCC και στο Well Checks.



Το πρόβλημα είναι στο γεγονός ότι εφόσον χρησιμοποιήσαμε τα σύμβολα vdd και gnd στο σχηματικό θα έπρεπε να τα είχαμε κάνει export στο layout. Δεν αρκεί απλώς να ονομάσουμε τα Arcs (μέταλλο1) με vdd και με gnd όπως κάναμε προηγουμένως.

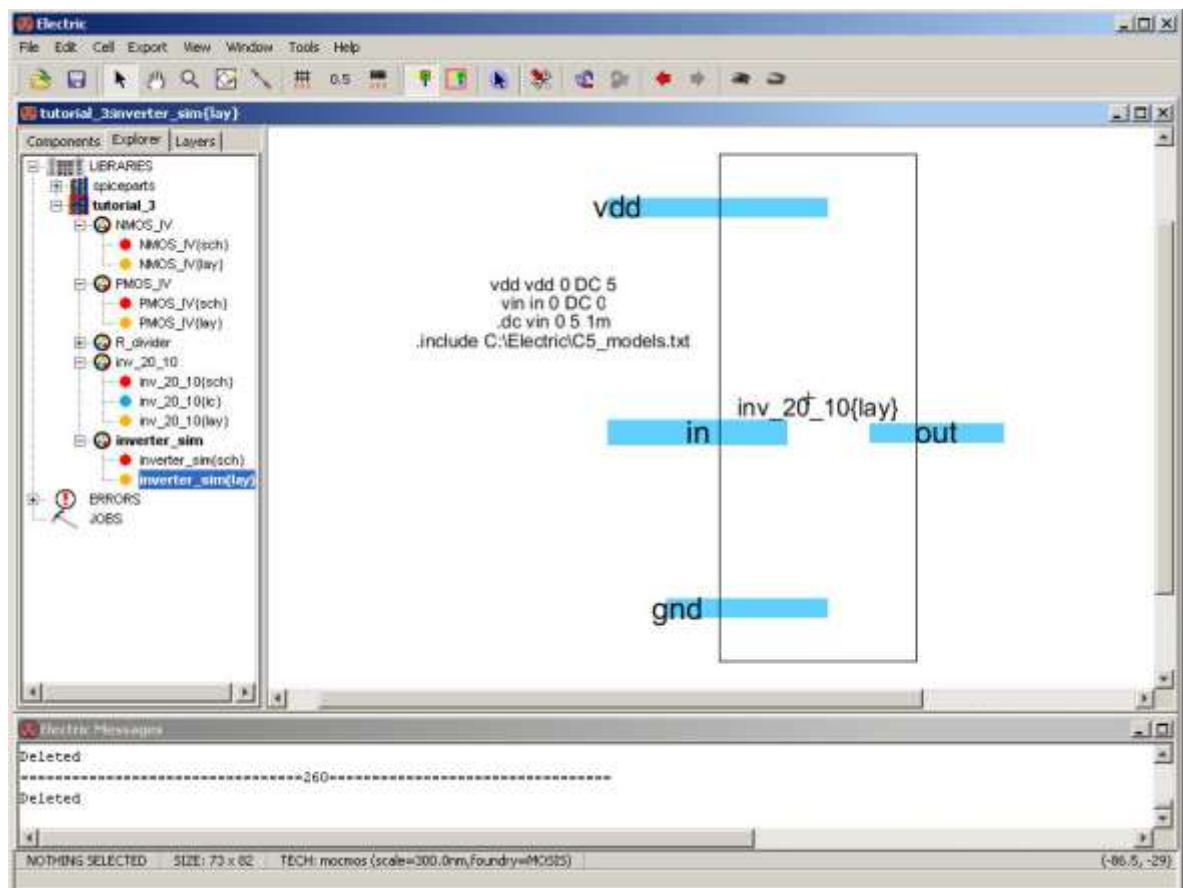
Θα πρέπει να διαγράψουμε τα ονόματα vdd και gnd από τα Arcs και να κάνουμε Export τα Pins που βρίσκονται στην άκρη των μετάλλων χρησιμοποιώντας τα ονόματα vdd και gnd. Θα χρησιμοποιήσουμε μικρά γράμματα στα vdd και gnd για τα Exports διαφορετικά ο έλεγχος NCC (και το Well Check) θα εμφανίσει λάθη.

Επίσης θα πρέπει να αλλάξουμε και το μέγεθος της γραμματοσειράς ώστε να έχει την τιμή 5.

Όπως έχει αναφερθεί και στο 2^ο εργαστήριο η διαδικασία Exports μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι η ίδια με την ονομασία των Arcs, διότι το αποτέλεσμα που βλέπουμε είναι όμοιο, αλλά αυτό είναι λάθος.

Τώρα τα δύο cells μπορούν να περάσουν τους ελέγχους DRC, NCC και Well Check χωρίς λάθη.

Τέλος το layout view είναι πλέον έτοιμο για προσομοίωση με το SPICE



Τέλος του τρίτου tutorial.