



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Σχεδίαση Μεικτών VLSI Κυκλωμάτων

Ενότητα 3: Ενισχυτές μιας βαθμίδας

Αγγελική Αραπογιάννη

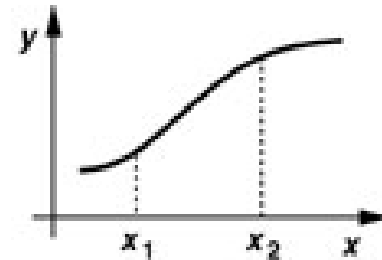
Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Ενισχυτές μιας βαθμίδας

Βασικές έννοιες

$$y(t) \approx \alpha_0 + \alpha_1 x(t) + \alpha_2 x^2(t) + \dots + \alpha_n x^n(t)$$
$$x_1 \leq x \leq x_2$$

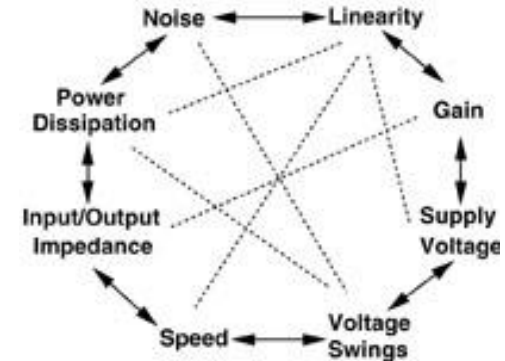


$$y(t) \approx \alpha_0 + \alpha_1 x(t)$$

$$\alpha_1 x(t) \ll \alpha_0$$

$$\Delta y = \alpha_1 \Delta x$$

Το οκτάγωνο της αναλογικής σχεδίασης



Βαθμίδα κοινής πηγής (1 από 2)

Βαθμίδα κοινής πηγής με φόρτο ωμική αντίσταση

Για $V_{in} = 0 \Rightarrow V_{out} = V_{DD}$

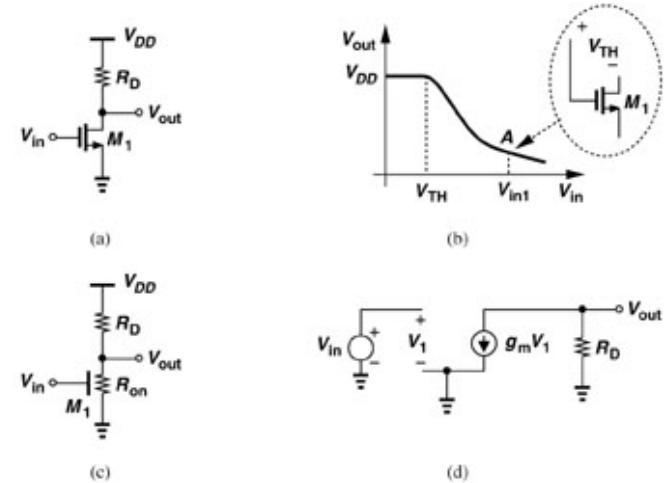
Για $V_{in} > V_{TH}$ $V_{out} = V_{DD} - R_D \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in} - V_{TH})^2$

Για $V_{out} = V_{in1} - V_{TH}$, $V_{in1} - V_{TH} = V_{DD} - R_D \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in1} - V_{TH})^2$,

Για $V_{in} > V_{in1}$, $V_{out} = V_{DD} - R_D \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} [2(V_{in} - V_{TH})V_{out} - V_{out}^2]$.

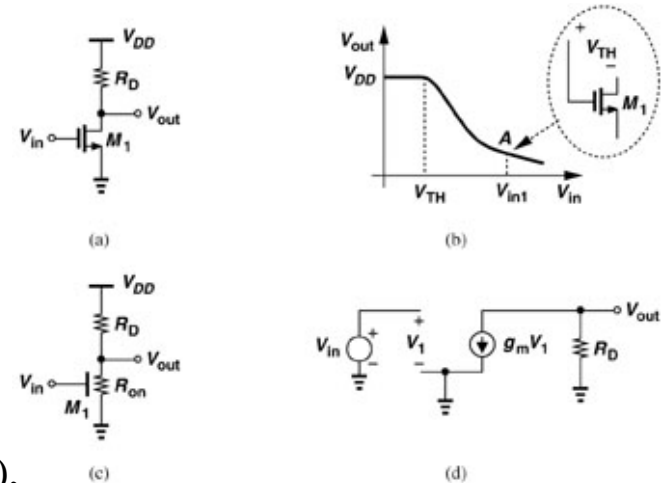
Για $V_{in} \gg V_{out} \ll 2(V_{in1} - V_{TH})$, $V_{out} = V_{DD} \frac{R_{on}}{R_{on} + R_D} = \frac{V_{DD}}{1 + \mu_n C_{ox} R_D \frac{W}{L} (V_{in} - V_{TH})}$

$A_v = \frac{\partial V_{out}}{\partial V_{in}} = -R_D \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in} - V_{TH}) = -g_m R_D$ $A_v = -\sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D} \frac{V_{RD}}{I_D} = -\sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \frac{V_{RD}}{I_D}}$



Βαθμίδα κοινής πηγής (2 από 2)

Βαθμίδα κοινής πηγής με φόρτο ωμική αντίσταση



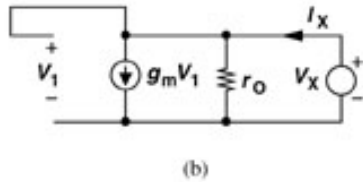
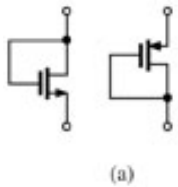
$$\text{Για } R_D \gg V_{out} = V_{DD} - R_D \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{out}),$$

$$\frac{\partial V_{out}}{\partial V_{in}} = -R_D \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in} - V_{TH}) (1 + \lambda V_{out}) - R_D \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in} - V_{TH})^2 \lambda \frac{\partial V_{out}}{\partial V_{in}}$$

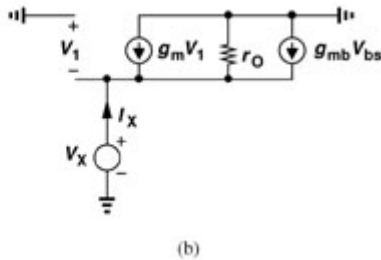
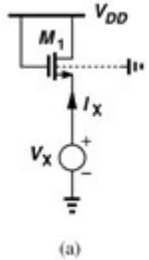
$$A_v = -R_D g_m - R_D I_D \lambda A_v \Rightarrow A_v = -\frac{g_m R_D}{1 + R_D \lambda I_D} \quad A_v = -g_m \frac{r_D R_D}{r_D + R_D}$$

Ενδογενής απολαβή: $A_{v_{max}} = -g_m r_D$

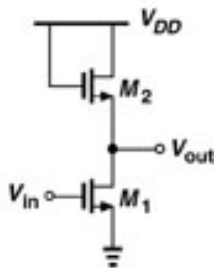
Βαθμίδα κοινής πηγής με φόρτο MOSFET σε συνδεσμολογία διόδου (1 από 3)



$$\frac{V_{\chi}}{I_{\chi}} = \frac{1}{g_m} \parallel r_D \approx \frac{1}{g_m}$$



$$(g_m + g_{mb})V_{\chi} + \frac{V_{\chi}}{r_D} = I_{\chi}$$



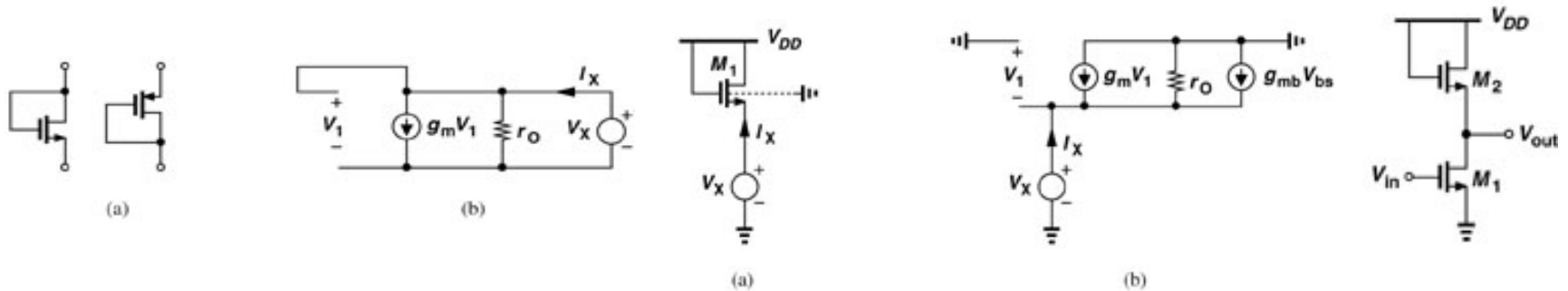
$$A_v = -g_{m1} \frac{1}{g_{m2} + g_{mb2}} = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} \frac{1}{1 + \eta} \quad \eta = \frac{g_{mb}}{g_m}$$

$$A_v = -\frac{\sqrt{2\mu_n C_{ox} (W/L)_1 I_{D1}}}{\sqrt{2\mu_n C_{ox} (W/L)_2 I_{D2}}} \frac{1}{1 + \eta} = -\frac{\sqrt{(W/L)_1}}{\sqrt{(W/L)_2}} \frac{1}{1 + \eta}$$

Γραμμική απόκριση όσο το M1 είναι στον κόρο.



Βαθμίδα κοινής πηγής με φόρτο MOSFET σε συνδεσμολογία διόδου (2 από 3)



Ανάλυση μεγάλου σήματος

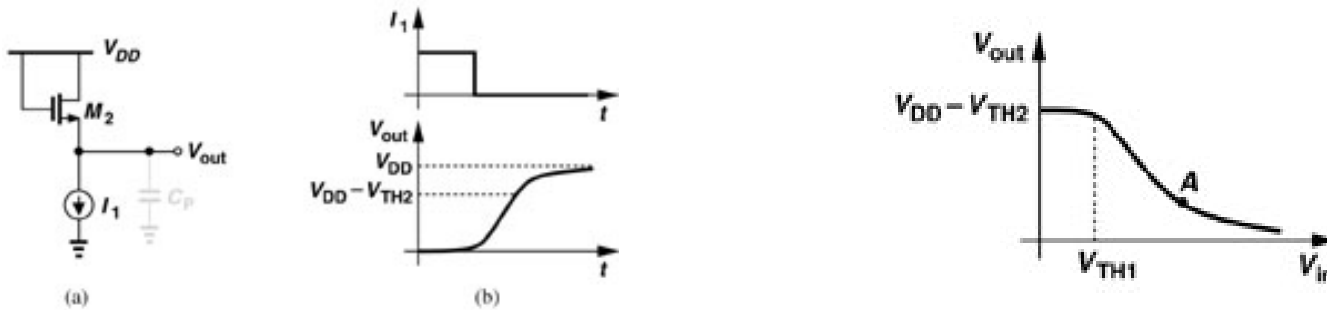
$$\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_1 (V_{in} - V_{TH1})^2 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_2 (V_{DD} - V_{out} - V_{TH2})^2,$$

$$\sqrt{\left(\frac{W}{L}\right)_1} (V_{in} - V_{TH1}) = \sqrt{\left(\frac{W}{L}\right)_2} (V_{DD} - V_{out} - V_{TH2}).$$

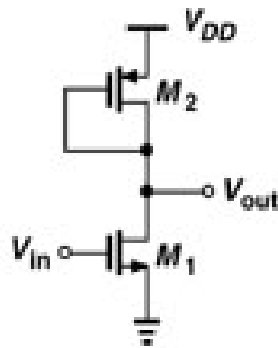
$$\sqrt{\left(\frac{W}{L}\right)_1} = \sqrt{\left(\frac{W}{L}\right)_2} \left(-\frac{\partial V_{out}}{\partial V_{in}} - \frac{\partial V_{TH2}}{\partial V_{in}}\right), \quad \text{όπου} \quad \frac{\partial V_{TH2}}{\partial V_{in}} = \frac{\partial V_{TH2}}{\partial V_{out}} \cdot \frac{\partial V_{out}}{\partial V_{in}} = \eta \cdot \frac{\partial V_{out}}{\partial V_{in}} \Rightarrow$$

$$\frac{\partial V_{out}}{\partial V_{in}} = -\sqrt{\frac{(W/L)_1}{(W/L)_2}} \frac{1}{1+\eta}.$$

Βαθμίδα κοινής πηγής με φόρτο MOSFET σε συνδεσμολογία διόδου (3 από 3)



PMOS



$$A_v = -\frac{\sqrt{\mu_n (W/L)_1}}{\sqrt{\mu_p (W/L)_2}}$$

Απαλλαγμένο από το φαινόμενο σώματος

$$\mu_n \left(\frac{W}{L}\right)_1 (V_{GS1} - V_{TH1})^2 \approx \mu_p \left(\frac{W}{L}\right)_2 (V_{GS2} - V_{TH2})^2,$$

Με τη διαμόρφωση μήκους καναλιού

$$A_v = -g_{m1} \left(\frac{1}{g_{m2}} \parallel r_{D1} \parallel r_{D2} \right),$$

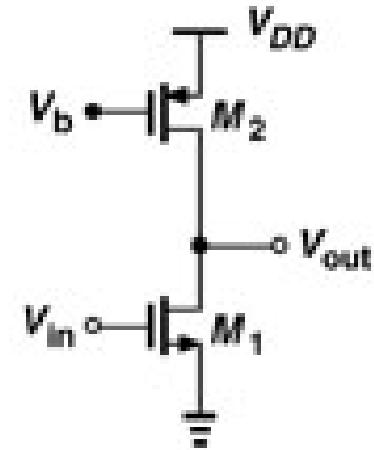


Βαθμίδα κοινής πηγής με φόρτο πηγή ρεύματος

$$A_v = -g_{m1}(r_{D1} \parallel r_{D2})$$

$$\text{Ενδογενής απολαβή: } g_{m1}r_{D1} = \sqrt{2\left(\frac{W}{L}\right)_1 \mu_n C_{ox} I_D} \frac{1}{\lambda I_D}$$

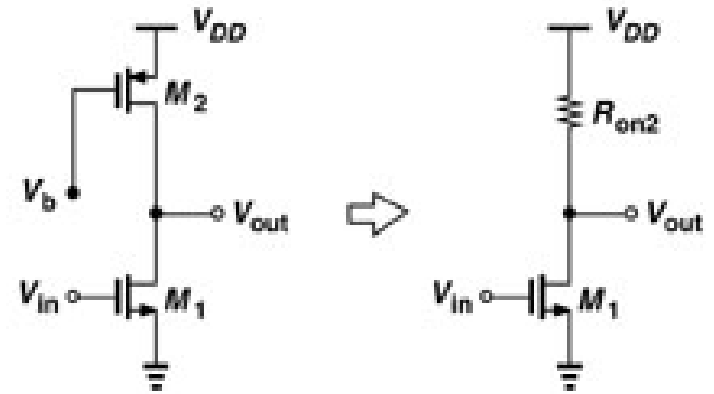
Η γραμμική περιοχή μπορεί να αυξηθεί με αύξηση του $(W/L)^2$



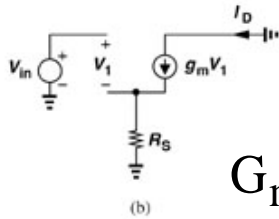
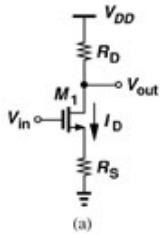
Βαθμίδα κοινής πηγής με φόρτο στην περιοχή τριόδου

$$R_{on2} = \frac{1}{\mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_2 (V_{DD} - V_b - |V_{THP}|)}$$

Μειονέκτημα: εξάρτηση από τις παραμέτρους.

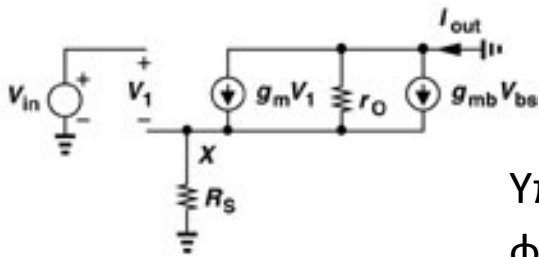


Βαθμίδα κοινής πηγής με ανασύζευξη (εκφυλισμό) πηγής (1 από 3)



$$I_D = f(V_{GS})$$

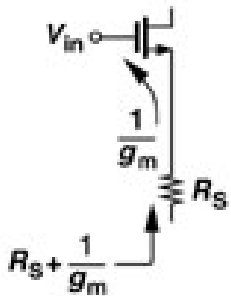
$$G_m = \partial I_D / \partial V_{in} = \frac{\partial f}{\partial V_{GS}} \frac{\partial V_{GS}}{\partial V_{in}} = (1 - R_S \frac{\partial I_D}{\partial V_{in}}) \frac{\partial f}{\partial V_{GS}} \Rightarrow G_m = \frac{g_m}{1 + g_m R_S}$$



$$A_v = -G_m R_D = \frac{-g_m R_D}{1 + g_m R_S}$$

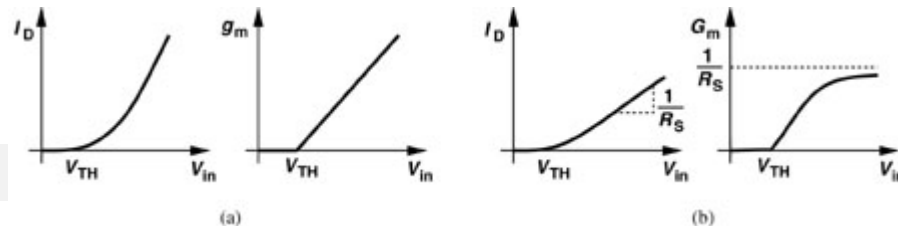
Υπολογισμός της διαγωγιμότητας αν συμπεριλάβουμε το φαινόμενο σώματος και τη διαμόρφωση μήκους καναλιού:

$$I_{out} = g_m V_1 - g_{mb} V_X - \frac{I_{out} R_S}{r_D} = g_m (V_{in} - I_{out} R_S) + g_{mb} (-I_{out} R_S) - \frac{I_{out} R_S}{r_D}$$



$$G_m = \frac{I_{out}}{V_{in}} = \frac{g_m r_D}{R_S + [1 + (g_m + g_{mb}) R_S] r_D}$$

$$A_v = -\frac{R_D}{(1/g_m) + R_S}$$



Βαθμίδα κοινής πηγής με ανασύζευξη (εκφυλισμό) πηγής (2 από 3)

Υπολογισμός της αντίστασης εξόδου

$$r_D [I_X + (g_m + g_{mb}) R_S I_X] + I_X R_S = V_X$$

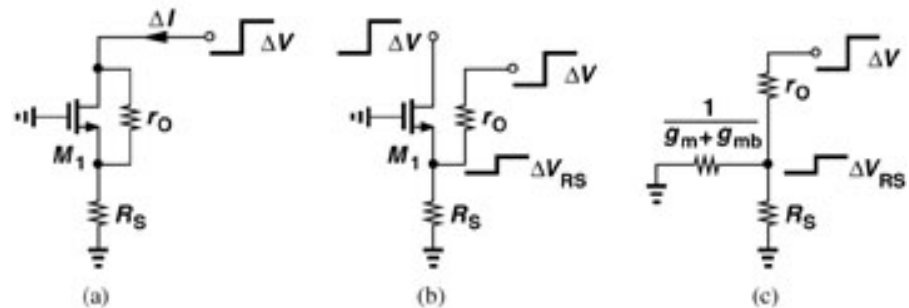
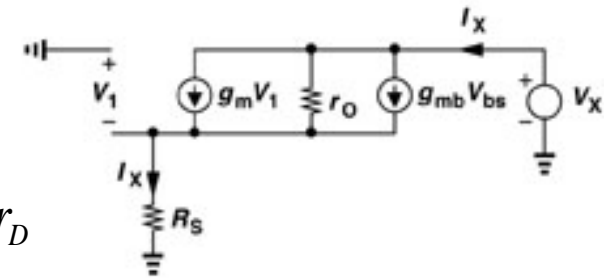
$$R_{out} = [1 + (g_m + g_{mb}) R_S] r_D + R_S = [1 + (g_m + g_{mb}) r_D] R_S + r_D$$

$$R_{out} \approx (g_m + g_{mb}) r_D R_S + r_D = [1 + (g_m + g_{mb}) R_S] r_D \Rightarrow R_{out} \gg r_D$$

$$\Delta V_{RS} = \Delta V \frac{\frac{1}{g_m + g_{mb}} // R_S}{\frac{1}{g_m + g_{mb}} // R_S + r_D}$$

$$\Delta I = \frac{\Delta V_{RS}}{R_S} = \Delta V \frac{1}{[1 + (g_m + g_{mb}) R_S] r_D + R_S}$$

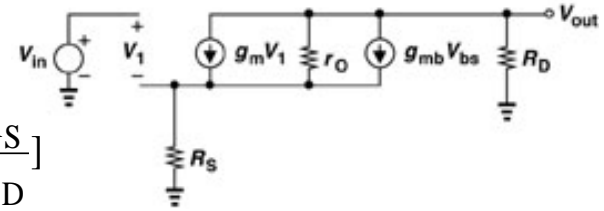
$$\frac{\Delta V}{\Delta I} = [1 + (g_m + g_{mb}) R_S] r_D + R_S$$



Βαθμίδα κοινής πηγής με ανασύζευξη (εκφυλισμό) πηγής (3 από 3)

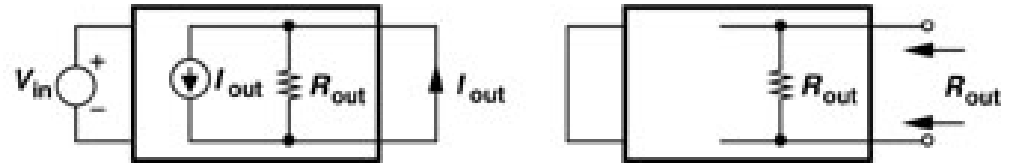
Υπολογισμός της απολαβής

$$I_{r0} = -\frac{V_{out}}{R_D} - (g_m V_1 + g_{mb} V_{bs}) = -\frac{V_{out}}{R_D} - [g_m (V_{in} + V_{out} \frac{R_S}{R_D}) + g_{mb} V_{out} \frac{R_S}{R_D}]$$



$$V_{out} = I_{r0} r_D - \frac{V_{out}}{R_D} R_S = -\frac{V_{out}}{R_D} r_D - [g_m (V_{in} + V_{out} \frac{R_S}{R_D}) + g_{mb} V_{out} \frac{R_S}{R_D}] r_D - V_{out} \frac{R_S}{R_D}$$

$$\boxed{\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-g_m r_D R_D}{R_D + R_S + r_D + (g_m + g_{mb}) R_S r_D}}$$



$$A_v = \frac{-g_m r_D R_D [R_S + r_D + (g_m + g_{mb}) R_S r_D]}{R_D + R_S + r_D + (g_m + g_{mb}) R_S r_D} \cdot \frac{1}{R_S + r_D + (g_m + g_{mb}) R_S r_D}$$

$$= -\frac{g_m r_D}{R_S + r_D + (g_m + g_{mb}) R_S r_D} \cdot \frac{R_D [R_S + r_D + (g_m + g_{mb}) R_S r_D]}{R_D + R_S + r_D + (g_m + g_{mb}) R_S r_D}$$

$$V_{out} = -I_{out} R_{out}, G_m = I_{out} / V_{in} \Rightarrow V_{out} = -G_m V_{in} R_{out} \Rightarrow A_v = -G_m R_{out}$$



Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Αραπογιάννη Αγγελική 2015. «Σχεδίαση Μεικτών VLSI Κυκλωμάτων. Ενισχυτές μιας βαθμίδας.». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/DI101/>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Οι εικόνες και τα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται είναι από το βιβλίο:

Behzad Razavi. 2000. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits* (1 ed.). McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA ©2000 .

