



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

# Σχεδίαση Μεικτών VLSI Κυκλωμάτων

Ενότητα 8: Τελεστικοί Ενισχυτές

Αγγελική Αραπογιάννη

Σχολή Θετικών Επιστημών

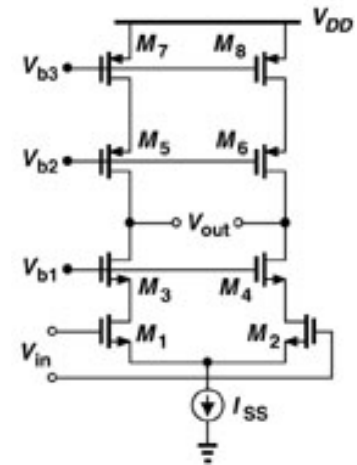
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

# Τελεστικοί ενισχυτές

Ενισχυτές γενικής χρήσεως

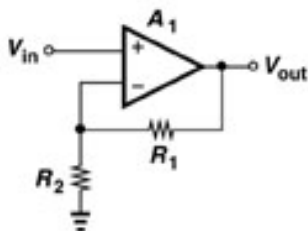
Ιδανικός Τελεστικός Ενισχυτής:

- Υψηλή απολαβή (10 ως 105)
- Μεγάλη αντίσταση εισόδου
- Μικρή αντίσταση εξόδου



# Παράμετροι επιδόσεων (1 από 3)

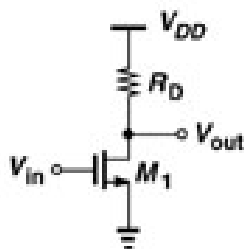
- Απολαβή



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_1}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \frac{A_1}{\frac{R_1 + R_2}{R_2} + A_1}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \approx \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \left(1 - \frac{R_1 + R_2}{R_2} \frac{1}{A_1}\right)$$

Σφάλμα απολαβής 1% αν  $A_1 = 1000$

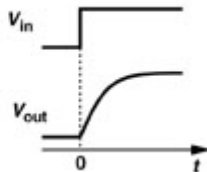
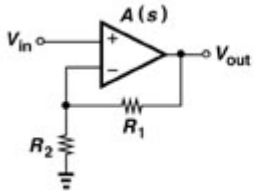


$$g_m R_D \approx 10$$

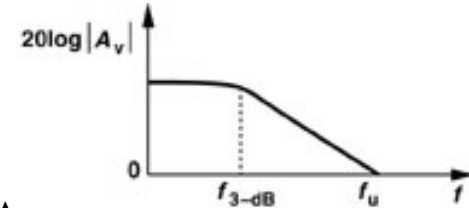
Σφάλμα απολαβής 20%  
(λόγω διακυμάνσεων της ευκινησίας φορέων, του πάχους του οξειδίου και της τιμής της αντίστασης)

# Παράμετροι επιδόσεων (2 από 3)

- Εύρος ζώνης μικρού σήματος



$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{A(s)}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A(s)}$$



$$\text{Αν } A(s) = A_0 / (1 + s/\omega_0) \quad \frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A_0 + \frac{s}{\omega_0}} = \frac{\frac{A_0}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A_0}}{1 + \frac{s}{(1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A_0)\omega_0}} \quad \tau = \frac{1}{(1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A_0)\omega_0}$$

$$\text{για } V_{in} = \alpha u(t) \quad V_{out}(t) \approx \alpha \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) u(t)$$

$$\text{με τελική τιμή } V_F \approx \alpha (1 + R_1/R_2) \quad \left(1 - \exp\left(-\frac{t_{1\%}}{\tau}\right)\right) = 0.99$$

$$t_{1\%} = \tau \ln 100 \approx 4.6\tau = 5 \text{ ns} \Rightarrow \tau \approx 1.09 \text{ ns, και } A_0\omega_0 = (1 + R_1/R_2)/\tau = 9.21 \text{ Grad/s (1.47 GHz).}$$



# Παράμετροι επιδόσεων (3 από 3)

- Εύρος ζώνης μεγάλου σήματος
- Μεταβολή της εξόδου
- Γραμμικότητα
- Θόρυβος και ολίσθηση τάσης (offset)
- Απόρριψη τροφοδοσίας



# Τελεστικοί ενισχυτές μιας βαθμίδας

Απολαβή  $g_{mN}(r_{ON} \parallel r_{OP})$  όχι πάνω από 20

Εύρος ζώνης από την  $C_L$

Πόλος καθρέφτη

Θόρυβος

$$V_{in, \min} = V_{CSS} + V_{GS1}$$

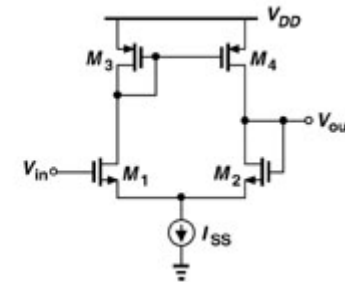
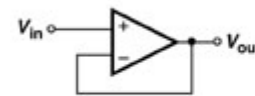
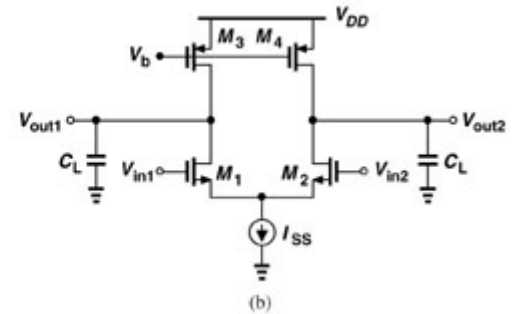
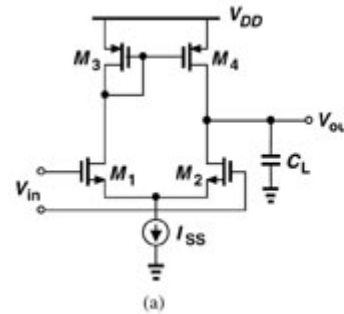
$$V_{in, \max} = V_{DD} - |V_{GS3}| + V_{TH1}$$

$$r_{out} = (r_{OP} \parallel r_{ON}) / [g_{mN}(r_{OP} \parallel r_{ON})]$$

$$= 1 / g_{mN}$$

Η αντίσταση εξόδου κλειστού βρόχου είναι σχετικά ανεξάρτητη

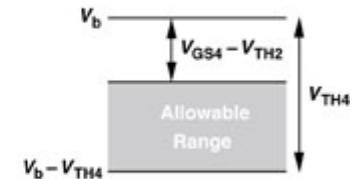
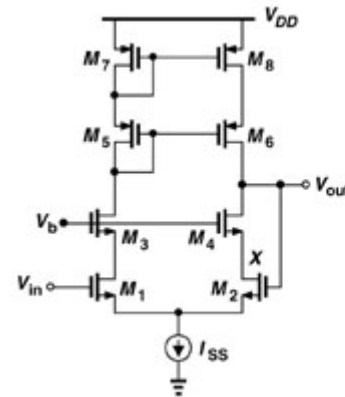
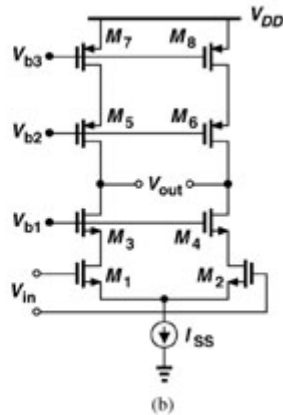
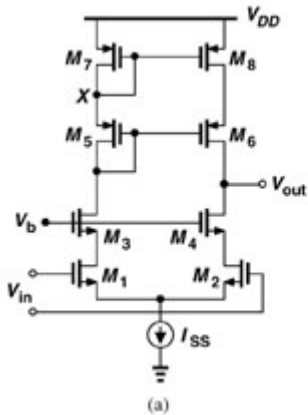
από την αντίσταση ανοιχτού βρόχου.



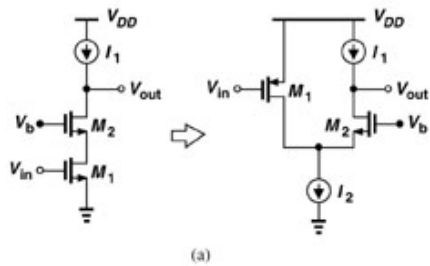
# Τηλεσκοπικοί ενισχυτές

Μεγάλη απολαβή  
Μικρή μεταβολή της τάσης εισόδου  
Αύξηση του αριθμού των πόλων

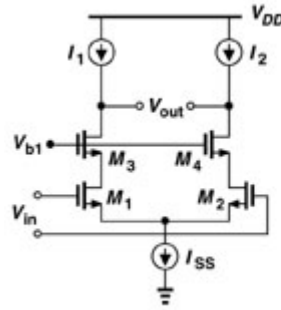
Δυσκολία στη βραχυκύκλωση  
εισόδου-εξόδου



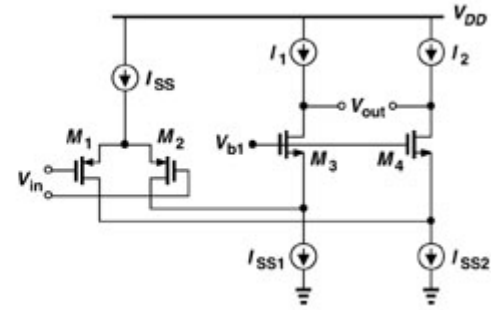
# Τελεστικοί ενισχυτές με αναδίπλωση



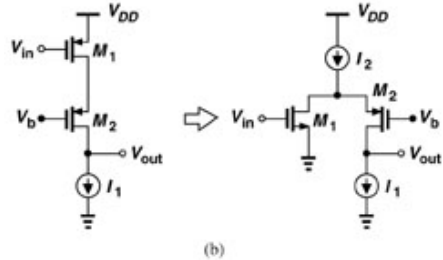
(a)



(a)

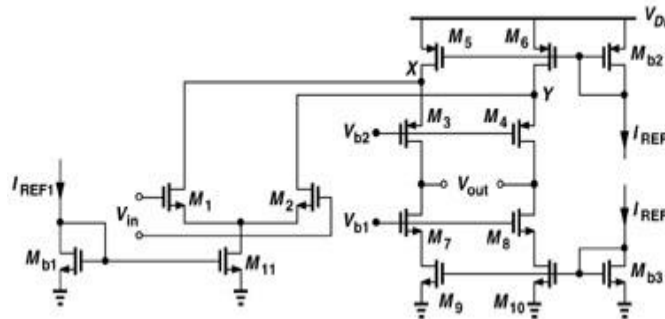
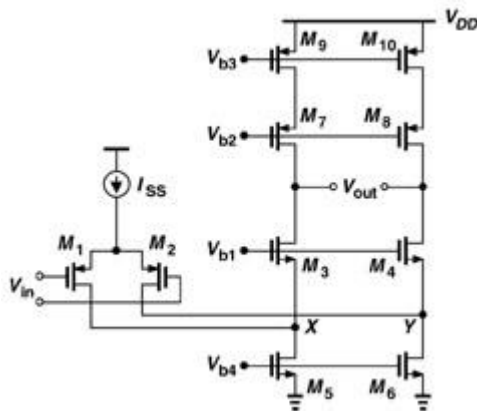


(b)



(b)

Μεγαλύτερες επιτρεπτές μεταβολές τάσης  
 Μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος  
 Δυνατότητα βραχυκύκλωσης εισόδου-εξόδου  
 Μικρότερη απολαβή  
 Πρόσθετοι πόλοι

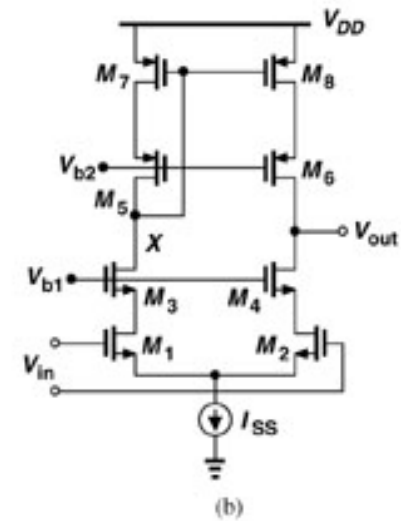
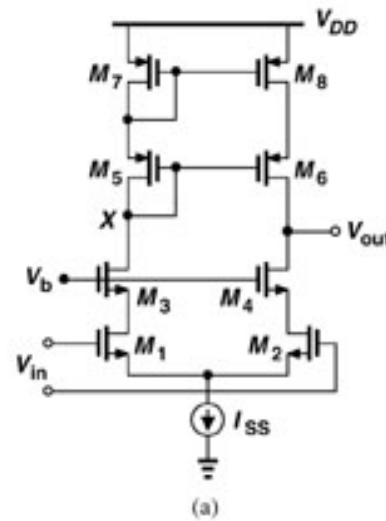


Μεγαλύτερη απολαβή  
 Πόλος σε χαμηλότερη συχνότητα



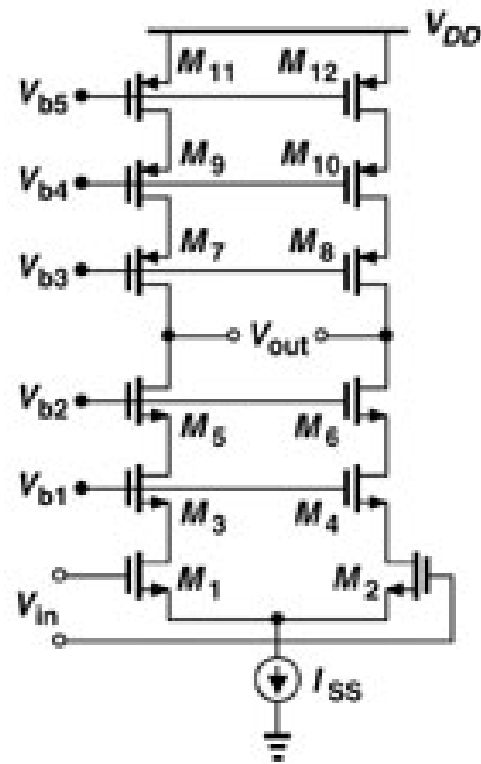
# Τηλεσκοπικοί τελεστικοί ενισχυτές με μονόπλευρη έξοδο

Βελτίωση της περιοχής μεταβολής της τάσης εξόδου.



# Τελεστικοί ενισχυτές με τριπλή συνδεσμολογία σειράς

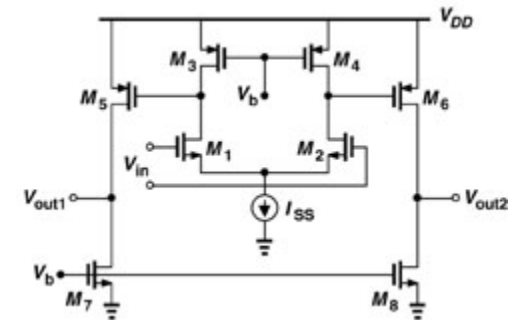
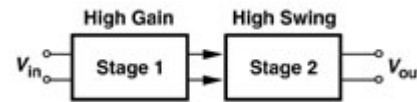
Δύσκολα  
χρησιμοποιείται με  
τροφοδοσία 3V  
ή μικρότερη.



# Τελεστικοί ενισχυτές δύο βαθμίδων (1 από 2)

Απολαβή συγκρίσιμη με του  
τελεστικού σε συνδεσμολογία  
σειράς

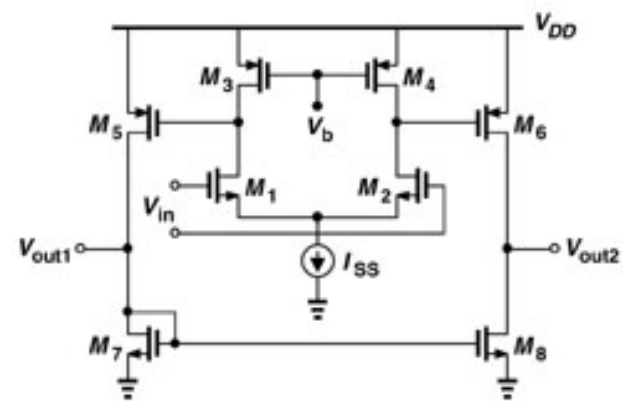
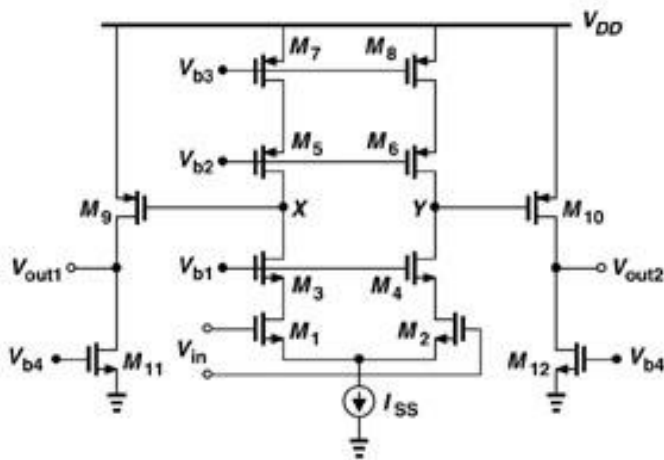
Μεγαλύτερο περιθώριο μεταβολής  
τάσης εξόδου



# Τελεστικοί ενισχυτές δύο βαθμίδων (2 από 2)

Πρώτη βαθμίδα τελεστικός σε συνδεσμολογία σειράς

Δεύτερη βαθμίδα με μονόπλευρη έξοδο



$$A_U \approx \{g_{m1,2} [(g_{m3,4} + g_{mb3,4})r_{O3,4} r_{O1,2}] \parallel [(g_{m5,6} + g_{mb5,6})r_{O5,6} r_{O7,8}]\} \times [g_{m9,10} (r_{O9,10} \parallel r_{O11,12})]$$

Περισσότερες βαθμίδες για αύξηση της απολαβής =>

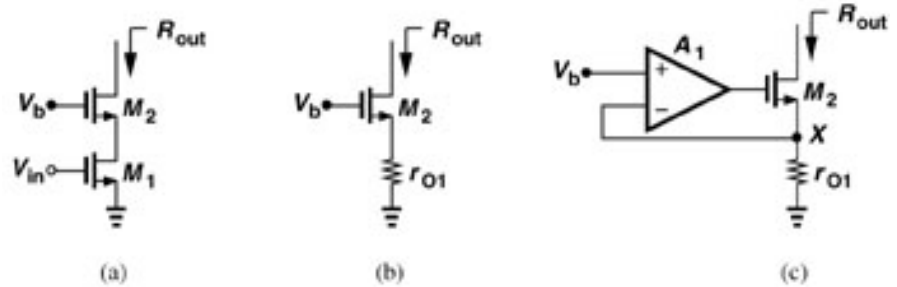
Αύξηση των πόλων => μείωση της σταθερότητας κλειστού βρόχου.

# Υποβοήθηση της Απολαβής (Gain Boosting)

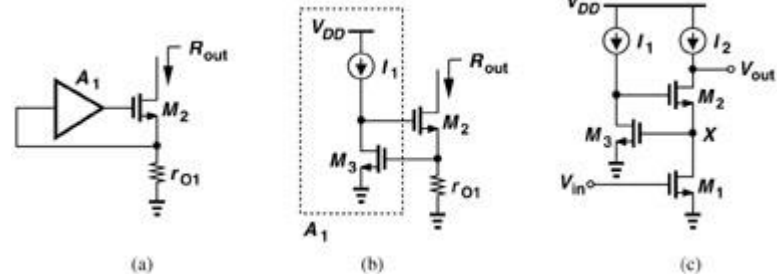
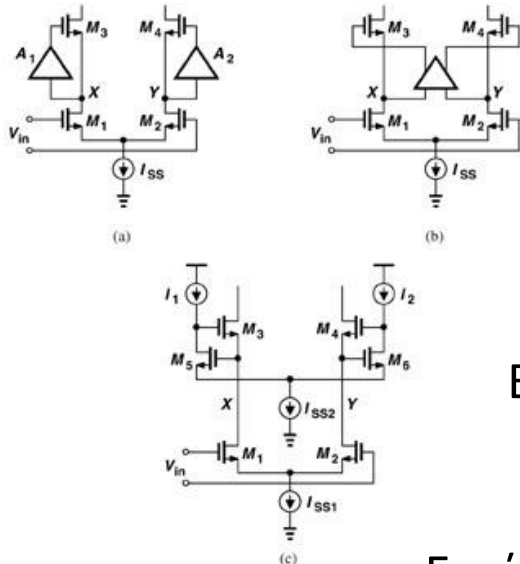
Αύξηση της αντίστασης εξόδου χωρίς προσθήκη διατάξεων σειράς

$$R_{out} = g_{m2}r_{o2}r_{o1}$$

$$R_{out} \approx A_1 g_{m2}r_{o2}r_{o1}$$



Υλοποίηση της ιδέας αύξησης της αντίστασης εξόδου



Εφαρμογή της ιδέας αύξησης της αντίστασης εξόδου σε διαφορική βαθμίδα

Εισάγονται πρόσθετοι πόλοι αλλά δεν επηρεάζουν όλο το σήμα



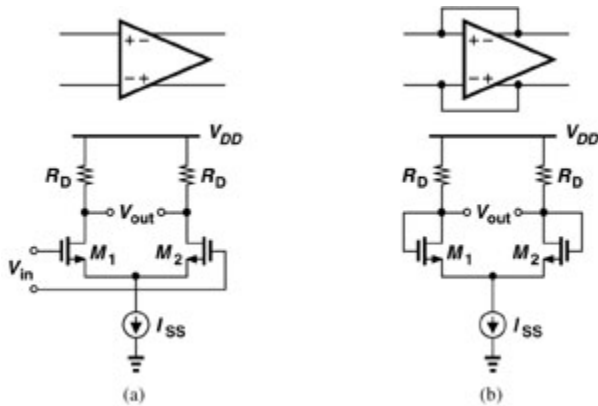
# Σύγκριση των επιδόσεων τοπολογιών των τελεστικών ενισχυτών

	Απολαβή	Μεταβολή της τάσης εξόδου	Ταχύτητα	Κατανάλωση ισχύος	Θόρυβος
Τηλεσκοπική	Μέτρια	Μέτρια	<b>Μέγιστη</b>	Χαμηλή	Χαμηλός
Αναδιπλωμένη συνδεσμολογία σειράς	Μέτρια	Μέτρια	Υψηλή	Μέτρια	Μέτριος
Δύο βαθμίδων	Υψηλή	<b>Μέγιστη</b>	Χαμηλή	Μέτρια	Χαμηλός
Με υποβοήθηση απολαβής	Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια	Υψηλή	Μέτριος

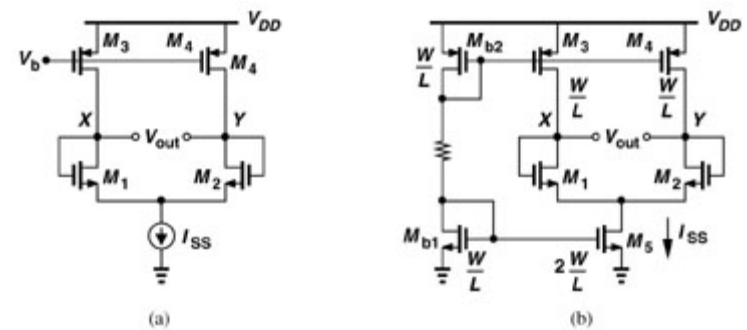


# Ανατροφοδότηση κοινού τρόπου

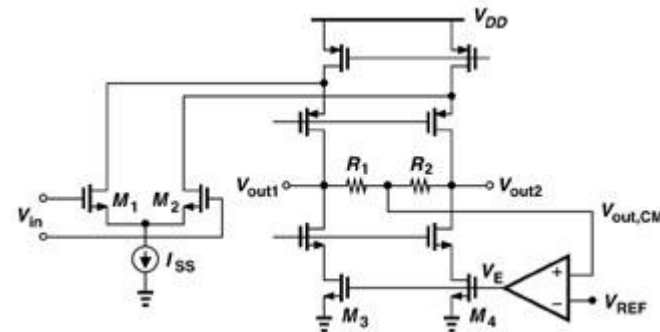
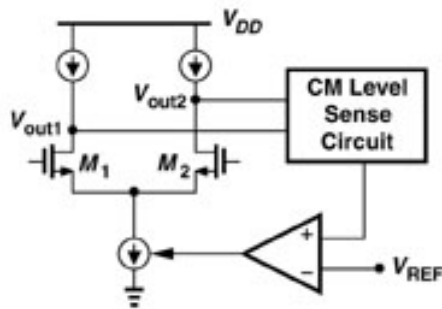
Καλά καθορισμένη στάθμη εξόδου CM



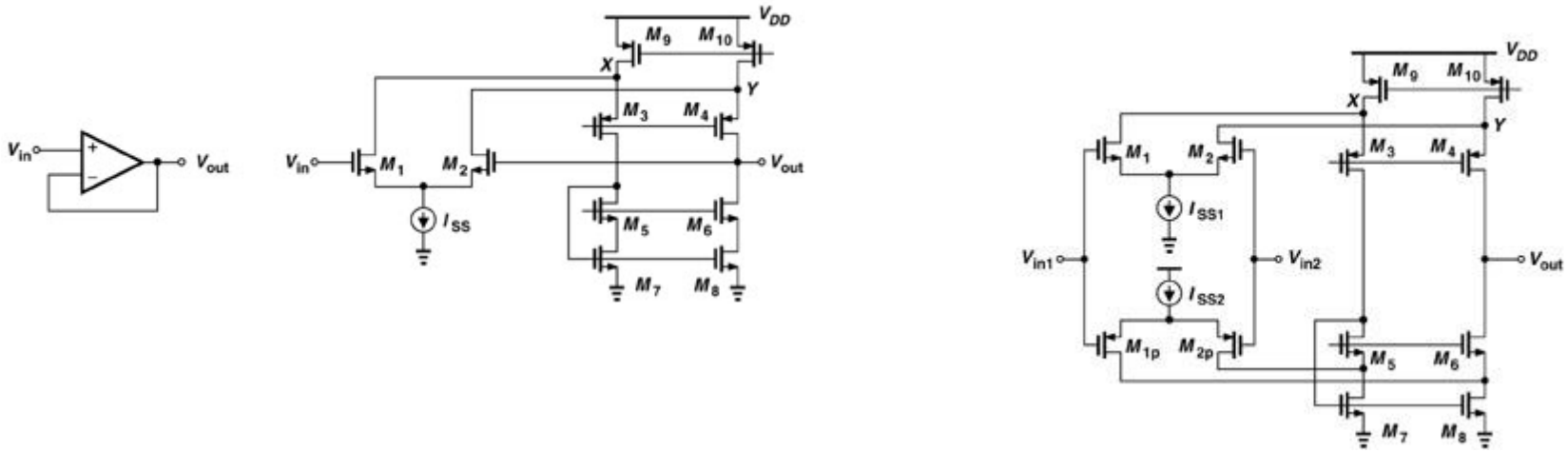
Κακώς καθορισμένη στάθμη εξόδου CM



Η αρχή της ανατροφοδότησης κοινού τρόπου



# Περιορισμοί της περιοχής τάσης εισόδου

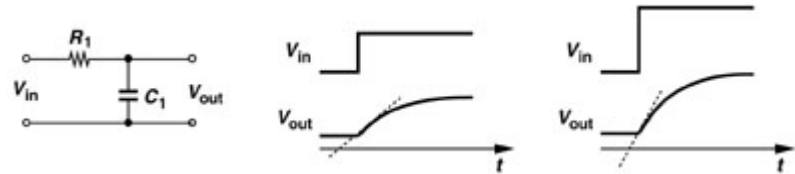




# Ρυθμός ανόδου (slew rate) (1 από 2)

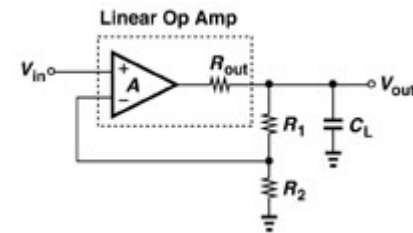
$$V_{out} = V_0[1 - \exp(-t/\tau)],$$

Όπου  $\tau = RC$



$$\frac{dV_{out}}{dt} = \frac{V_0}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$$\left[ \left( V_{in} - V_{out} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) A - V_{out} \right] \frac{1}{R_{out}} = \frac{V_{out}}{R_1 + R_2} + V_{out} C_L s$$



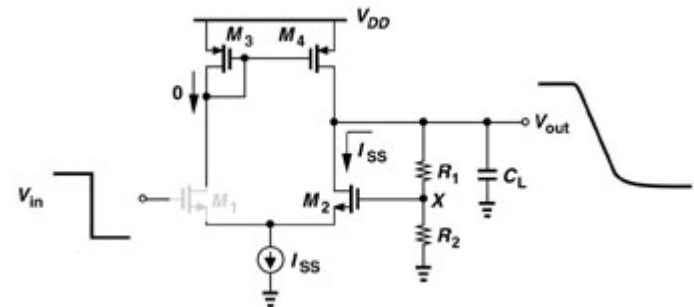
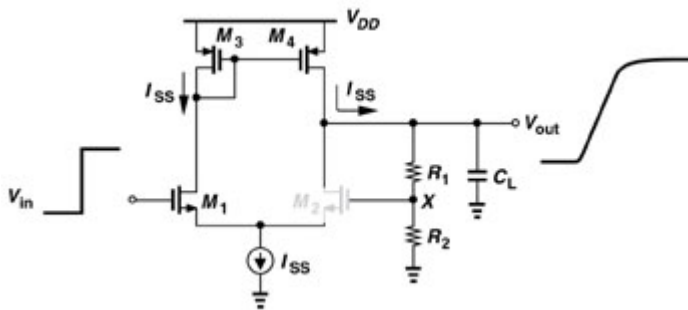
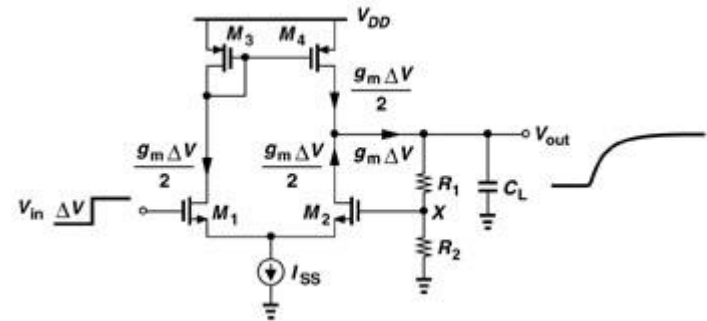
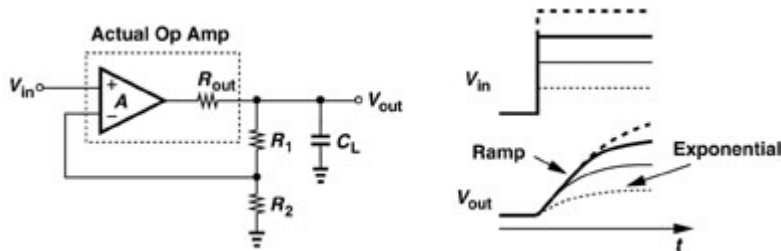
$$\text{Αν } R_1 + R_2 \gg R_{out} \quad \frac{V_{out}}{V_{in}}(s) \approx \frac{A}{\left( 1 + A \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left[ 1 + \frac{R_{out} C_L}{1 + A R_2 / (R_1 + R_2)} s \right]}$$



# Ρυθμός ανόδου (slew rate) (2 από 2)

Η απόκριση βήματος δίνεται από την 
$$V_{out} = V_0 \frac{A}{1 + A \frac{R_2}{R_1 + R_2}} \left( 1 - \exp \frac{-t}{\frac{C_L R_{out}}{1 + A R_2 / (R_1 + R_2)}} \right)$$

Γραμμική αποκατάσταση



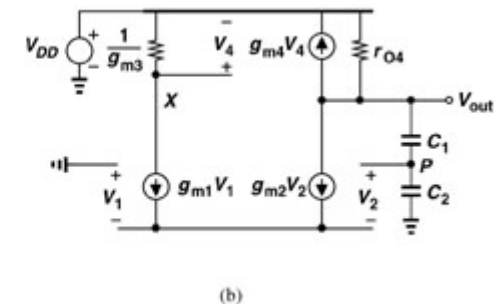
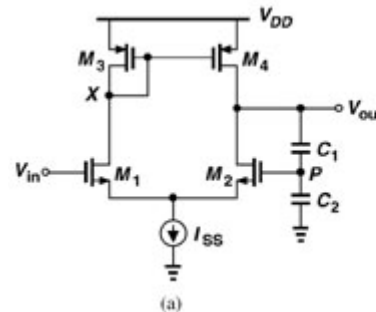
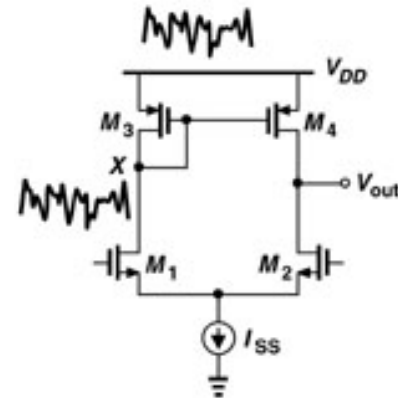
# Απόρριψη της τροφοδοσίας

$$PSRR \approx g_{mN} (r_{OP} \parallel r_{ON})$$

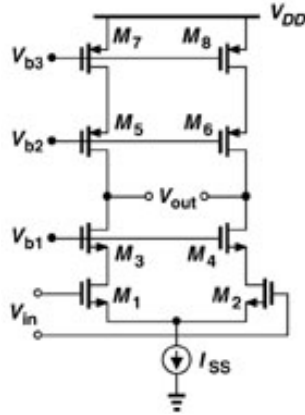
$$V_{out} \frac{C_1}{C_1 + C_2} - V_2 = -V_1 \quad V_2 = \frac{V_{out}}{2} \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

$$-\frac{g_{m1} V_1}{g_{m3}} g_{m4} - \frac{V_{DD} - V_{out}}{r_{O4}} + g_{m2} V_2 = 0$$

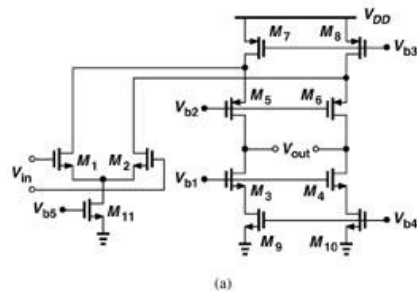
$$\frac{V_{out}}{V_{DD}} = \frac{1}{g_{m2} r_{O4} \frac{C_1}{C_1 + C_2} + 1} \quad PSRR \approx \frac{1 + \frac{C_2}{C_1}}{\frac{C_1}{C_1 + C_2} + 1}$$



# Θόρυβος στους Τελεστικούς Ενισχυτές (1 από 2)

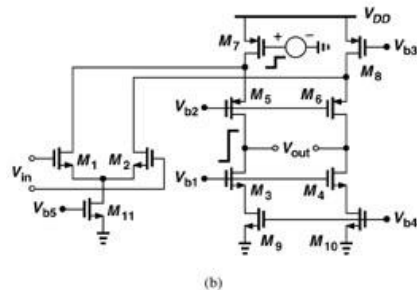


$$\overline{V_n^2} = 4kT \left( 2 \frac{2}{3g_{m1,2}} + 2 \frac{2g_{m7,8}}{3g_{m1,2}^2} \right) + 2 \frac{K_N}{(WL)_{1,2} C_{OX} f} + 2 \frac{K_P}{(WL)_{7,8} C_{OX} f} \frac{g_{m7,8}^2}{g_{m1,2}^2}$$



$$\overline{V_{n,out}^2} |_{M7,8} = 2 \left( 4kT \frac{2}{3g_{m7,8}} g_{m7,8}^2 R_{out}^2 \right)$$

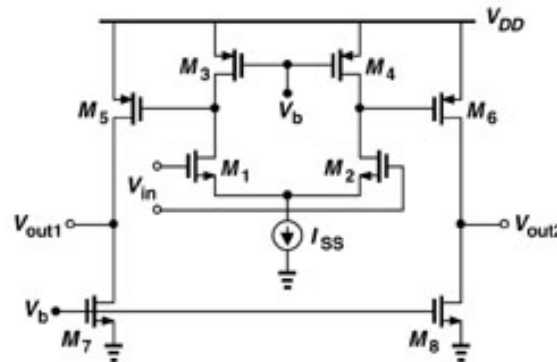
$$\overline{V_{n,out}^2} |_{M9,10} = 2 \left( 4kT \frac{2}{3g_{m9,10}} g_{m9,10}^2 R_{out}^2 \right)$$



$$\overline{V_{n,int}^2} = 8kT \left( \frac{2}{3g_{m1,2}} + \frac{2g_{m7,8}}{3g_{m1,2}^2} + \frac{2g_{m9,10}}{3g_{m1,2}^2} \right)$$



# Θόρυβος στους Τελεστικούς Ενισχυτές (2 από 2)



$$\overline{V_n^2} = 2 \times 4kT \frac{2}{3} (g_{m5} + g_{m7}) (r_{O5} \parallel r_{O7})^2 \frac{1}{g_{m1}^2 (r_{O1} \parallel r_{O3})^2 g_{m5}^2 (r_{O5} \parallel r_{O7})^2} = \frac{16kT}{3} \frac{g_{m5} + g_{m7}}{g_{m1}^2 g_{m5}^2 (r_{O1} \parallel r_{O3})^2}$$

$$\overline{V_n^2} |_{M1-4} = 2 \times 4kT \frac{2}{3} \frac{g_{m5} + g_{m7}}{g_{m5}^2 (r_{O1} \parallel r_{O3})^2} \quad \overline{V_{n,tot}^2} = \frac{16kT}{3} \frac{1}{g_{m1}^2} \left[ g_{m1} + g_{m3} + \frac{g_{m5} + g_{m7}}{g_{m5}^2 (r_{O1} \parallel r_{O3})^2} \right]$$

# 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. Τελεστικοί Ενισχυτές.». 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.

