Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ

Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής & Συστημάτων Πληροφορικής

Εργαστήριο Ηλεκτρονικής

Ηλεκτρονική Ι (4ου Εξαμήνου)

3η Σειρά Ασκήσεων

Ονοματεπώνυμο : Δημήτριος Ζάρρας

Α.Μ. : 031 15 092

Εξάμηνο : 4º

Ακαδημαϊκή Περίοδος : 2016 – 2017

Διδάσκων : Αν. Καθηγητής Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης

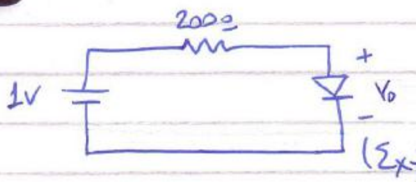
Μελέτη: Δίοδοι – Κεφ. 3 (εκτός η παράγραφος 3.7, εγκυκλοπαιδική η 3.8) από το βιβλίο «Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα», 5η Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Δημήτριος Ζάρρας

Ζάρρας Δημήτριος

Α.Μ.: 031 15 092
Εξάμηνο: 4ο
Σχολή: ΗΜΜΥ ΕΜΠ

Άσκηση 1 – Πρόβλημα 3.34



(Σχήμα 1)

(α) Υποθέτοντας, αρχικά, ότι $V_D = 0{,}7V$ μπορούμε από το κύκλωμα να λάβουμε μια προσεγγιστική εκτίμηση του αναμενόμενου ρεύματος i_D της διόδου.

Από Ν.Τ.Κ.: $-1 + 200 \cdot i_D + V_D = 0 \Rightarrow i_D = \frac{1-0{,}7}{200} A \Rightarrow i_D = 0{,}0015 A \Rightarrow \boxed{i_D = 1{,}5mA}$.

(β) Με υπόθεση για $V_D = 0{,}7V$ βρήκαμε από το κύκλωμα $i_D = 1{,}5mA$
Χρησιμοποιούμε, τώρα, την εξίσωση της διόδου, για να υπολογίσουμε μια καλύτερη προσεγγιστική εκτίμηση της V_D, βάσει του i_D που μόλις υπολογίστηκε. Είναι:

$$\left.\begin{array}{l} I_1 = I_s \cdot e^{V_1/nV_T} \\ I_2 = I_s \cdot e^{V_2/nV_T} \end{array}\right\} \overset{(\div)}{\Rightarrow} \frac{I_2}{I_1} = e^{(V_2-V_1)/nV_T} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_2 - V_1 = nV_T \ln\frac{I_2}{I_1} \Rightarrow V_D = V_1 + nV_T \ln\frac{i_D}{I_1} \xrightarrow[\text{για } V_1 = 0{,}7V]{\text{παίρνω } I_1 = 1mA}$$

$$\Rightarrow V_D = \left(0{,}7 + 2 \cdot 0{,}025 \cdot \ln\frac{0{,}0015}{0{,}001}\right) V \Rightarrow V_D = (0{,}7 + 2 \cdot 0{,}025 \cdot 0{,}4055) V \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_D = 0{,}720 V.$$

Άρα, η πρώτη επανάληψη δίνει $i_D = 1{,}5mA$ και $V_D = 0{,}720 V$.

Πάλι, με παρόμοιο τρόπο, για $V_D = 0,720V$ ο Ν.Τ.Κ. δίνει:

$$i_D = \frac{1-0,720}{200}A \Rightarrow i_D = 0,0014A \Rightarrow i_D = 1,4mA.$$

Για το ρεύμα αυτό: $V_2 - V_1 = nV_T \ln\frac{I_2}{I_1} \Rightarrow V_D = \left(0,720 + 2\cdot 0,025 \cdot \ln\frac{0,0014}{0,0015}\right)V \Rightarrow$
$\Rightarrow V_D = (0,720 + 0,05\cdot(-0,069))V \Rightarrow V_D = 0,717V$

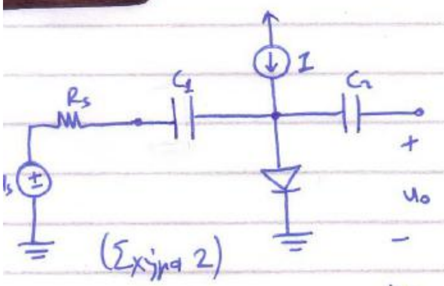
Άρα, η δεύτερη επανάληψη δίνει $i_D = 1,4mA$ και $V_D = 0,717V$.
Συνεχίζουμε και ο Ν.Τ.Κ. δίνει:

$$i_D = \frac{1-0,717}{200}A \Rightarrow i_D = 0,00142A \Rightarrow$$
$$\Rightarrow i_D = 1,42mA.$$

Για το ρεύμα αυτό: $V_2 - V_1 = nV_T \ln\frac{I_2}{I_1} \Rightarrow V_D = \left(0,717 + 2\cdot 0,025 \ln\frac{0,00142}{0,0014}\right)V \Rightarrow$
$\Rightarrow V_D = (0,717 + 0,05\cdot 0,1419)V \Rightarrow V_D = 0,718V$

Άρα, η τρίτη επανάληψη δίνει $i_D = 1,42mA$ και $V_D = 0,718V$.
Βλέπουμε ότι οι τιμές των V_D και i_D δε διαφέρουν σημαντικά από εκείνες που λάβαμε στην προηγούμενη επανάληψη. Επομένως, θεωρούμε ότι δεν απαιτείται μια νέα επανάληψη και δεχόμαστε ως τελικές λύσεις τις: $\boxed{V_D = 0,718V}$ και $\boxed{i_D = 1,42mA}$.

Άσκηση 2 – Πρόβλημα 3.54

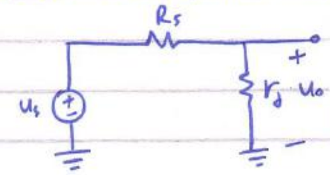


(Σχήμα 2)

Δίνεται ότι οι πυκνωτές C_1 και C_2 είναι πολύ μεγάλοι και επιτρέπουν τη διέλευση του σήματος v_s (επιτρέπουν να περνούν τα AC), ενώ εμποδίζουν τη ροή του ρεύματος I (εμποδίζουν να περνούν τα DC).

Άλλωστε, ο πυκνωτής έχει σύνθετη αντίσταση: $Z_C = \frac{1}{sC} = \frac{1}{j\omega C}$, οπότε σε DC λειτουργία είναι $\omega = 0 \Rightarrow Z_C = \infty$ (κόβει τα DC) και σε AC λειτουργία, για πεπερασμένη συχνότητα ω έχει $C \to \infty$ (αφού C_1, C_2 πολύ μεγάλοι) $\Rightarrow Z_C = 0$ (περνά τα AC).

Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα για την προσέγγιση ασθενούς AC σήματος προκύπτει ανοικτοκυκλώνοντας την πηγή ρεύματος I και βραχυκυκλώνοντας τους πυκνωτές C_1 και C_2, ενώ η δίοδος αντικαθίσταται από την αντίστοιχη αντίσταση ασθενούς σήματος. Θα είναι:



(Σχήμα 2')

Ενώ, στην DC ανάλυση του Σχήματος 2, με ανοικτοκύκλωση των C_1 και C_2 θα είναι:

(Σχήμα 2'')

Δηλαδή το DC ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο είναι όλο το I: $I_D = I$.

Άρα, για το Σχήμα 2' θα είναι: $r_d = \frac{nV_T}{I_D} \Rightarrow r_d = \frac{nV_T}{I}$ (1)

Από διαίρεση τάσης στο Σχήμα 2' είναι: $u_o = u_s \frac{r_d}{r_d + R_s} \overset{(1)}{=} u_s \frac{\frac{nV_T}{I}}{\frac{nV_T}{I} + R_s} \Rightarrow$

$$\Rightarrow \boxed{u_o = u_s \frac{nV_T}{nV_T + IR_s}} \quad (2)$$

Για $u_s = 10mV$, $R_s = 1k\Omega$ και $n = 2$ η παραπάνω εξίσωση δίνει:

$$u_o = 0{,}01 \cdot \frac{2 \cdot 0{,}025}{2 \cdot 0{,}025 + 1000 \cdot I} \ (V)$$

Άρα: $\underline{u_o(I = 1mA) = 0{,}476\ mV}$

$\underline{u_o(I = 0{,}1mA) = 3{,}333\ mV}$

$\underline{u_o(I = 1\mu A) = 9{,}804\ mV}$

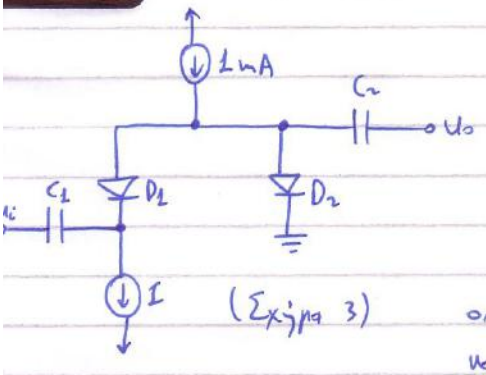
Η u_o γίνεται στο μισό της u_s όταν: $u_o = \frac{u_s}{2} \overset{(2)}{\Leftrightarrow} \frac{u_s}{2} = u_s \frac{nV_T}{nV_T + IR_s} \Leftrightarrow$

$\Leftrightarrow \frac{1}{2} = \frac{0{,}05}{0{,}05 + 1000 I} \Leftrightarrow 0{,}05 + 1000 \cdot I = 2 \cdot 0{,}05 \Leftrightarrow I = 0{,}00005 A$

$\Leftrightarrow \boxed{I = 50 \mu A}$, ώστε $u_o = \frac{u_s}{2}$.

Το κύκλωμα λειτουργεί σαν εξασθενητής σήματος, όπου ο συντελεστής εξασθένησης ελέγχεται από το συνεχές ρεύμα I.

Άσκηση 3 – Πρόβλημα 3.56

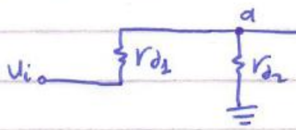


(Σχήμα 3)

Δίνεται ότι οι πυκνωτές C_1 και C_2 είναι μεγάλοι πυκνωτές ζεύξης. Έτσι, θα επιτρέπουν τη διέλευση του σήματος u_i (AC), ενώ θα εμποδίζουν τη ροή των ρευμάτων (DC) των σταθερών πηγών.

Άλλωστε, ο πυκνωτής έχει σύνθετη αντίσταση: $Z_C = \frac{1}{sC} = \frac{1}{j\omega C}$ οπότε σε DC λειτουργία είναι $\omega=0 \Rightarrow Z_C=\infty$ (κόβει τα DC) και σε AC λειτουργία, για πεπερασμένη συχνότητα ω έχει $C\to\infty$ (αφού C_1, C_2 μεγάλοι) $\Rightarrow Z_C=0$ (περνά τα AC).

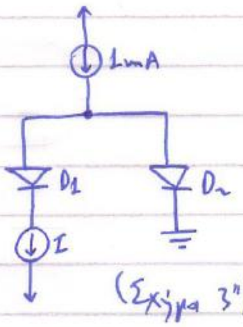
Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα για την προσέγγιση ασθενούς AC σήματος προκύπτει απενεργοποιώντας τις σταθερές πηγές ρεύματος και βραχυκυκλώνοντας τους πυκνωτές C_1 και C_2, ενώ οι δίοδοι αντικαθίστανται από τις αντίστοιχες αντιστάσεις ασθενούς σήματος. Θα είναι:



(Σχήμα 3')

Διαίρεση τάσης: $u_o = u_i \frac{r_{d2}}{r_{d1}+r_{d2}} \Rightarrow \frac{u_o}{u_i} = \frac{r_{d2}}{r_{d1}+r_{d2}}$ (1)

Ενώ, στην DC ανάλυση του Σχήματος 3, με απενεργοποίηση των C_1 και C_2 θα είναι:

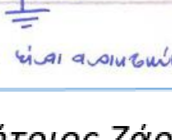


(Σχήμα 3'')

(a) $I = 0\,\mu A$

$I=0\,\mu A$, άρα η D_1 δεν άγει. Οπότε, $I_{D2} = 1mA$.

$r_{d1} = \frac{nV_T}{I} = \infty$, $r_{d2} = \frac{nV_T}{I_{D2}} = \frac{0{,}025}{0{,}001}\,\Omega \Rightarrow r_{d2} = 25\,\Omega$:



(η $r_{d1}=\infty$ είναι ανοιχτοκύκλωμα)

Η r_{d2} δε διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, άρα $i(r_{d2})=0=\frac{\Delta V}{r_{d2}} \Rightarrow \Delta V=0 \Rightarrow u_o=0$. Άρα, $\boxed{\frac{u_o}{u_i}=0}$, για $I=0\mu A$

β) $\underline{I=1\mu A}$

$I_{D2}=1mA-1\mu A=999\mu A.$

$r_{d1}=\frac{nV_T}{I}=\frac{0{,}025}{0{,}000001}\,\Omega \Rightarrow r_{d1}=25k\Omega$, $r_{d2}=\frac{nV_T}{I_{D2}}=\frac{0{,}025}{0{,}000999}\,\Omega \Rightarrow r_{d2}=25{,}025\,\Omega$

$(1) \Rightarrow \frac{u_o}{u_i}=\frac{25{,}025}{25000+25{,}025}=0{,}001 \Rightarrow \boxed{\frac{u_o}{u_i}=0{,}001}$, για $I=1\mu A$

γ) $\underline{I=10\mu A}$

$I_{D2}=1mA-10\mu A=990\mu A.$

$r_{d1}=\frac{nV_T}{I}=\frac{0{,}025}{0{,}00001}\,\Omega \Rightarrow r_{d1}=2{,}5k\Omega$, $r_{d2}=\frac{nV_T}{I_{D2}}=\frac{0{,}025}{0{,}00099}\,\Omega \Rightarrow r_{d2}=25{,}25\,\Omega$

$(1) \Rightarrow \frac{u_o}{u_i}=\frac{25{,}25}{2500+25{,}25}=0{,}01 \Rightarrow \boxed{\frac{u_o}{u_i}=0{,}01}$, για $I=10\mu A$.

δ) $\underline{I=100\mu A}$

$I_{D2}=1mA-100\mu A=900\mu A.$

$r_{d1}=\frac{nV_T}{I}=\frac{0{,}025}{0{,}0001}\,\Omega \Rightarrow r_{d1}=250\,\Omega$, $r_{d2}=\frac{nV_T}{I_{D2}}=\frac{0{,}025}{0{,}0009}\,\Omega \Rightarrow r_{d2}=27{,}78\,\Omega$

$(1) \Rightarrow \frac{u_o}{u_i}=\frac{27{,}78}{250+27{,}78}=0{,}1 \Rightarrow \boxed{\frac{u_o}{u_i}=0{,}1}$, για $I=100\mu A$.

ε) $\underline{I=500\mu A}$

$I_{D2}=1mA-500\mu A=500\mu A.$

$r_{d1}=\frac{nV_T}{I}=\frac{0{,}025}{0{,}0005}\,\Omega \Rightarrow r_{d1}=50\,\Omega$, $r_{d2}=\frac{nV_T}{I_{D2}}=\frac{0{,}025}{0{,}0005}\,\Omega \Rightarrow r_{d2}=50\,\Omega$

$(1) \Rightarrow \frac{u_o}{u_i}=\frac{50}{50+50}=\frac{1}{2} \Rightarrow \boxed{\frac{u_o}{u_i}=\frac{1}{2}}$, για $I=500\mu A$.

στ) $\underline{I=600\mu A}$

$I_{D2}=1mA-600\mu A=400\mu A.$

$r_{d1}=\frac{nV_T}{I}=\frac{0{,}025}{0{,}0006}\,\Omega \Rightarrow r_{d1}=41{,}67\,\Omega$, $r_{d2}=\frac{nV_T}{I_{D2}}=\frac{0{,}025}{0{,}0004}\,\Omega \Rightarrow r_{d2}=62{,}5\,\Omega$

$(1) \Rightarrow \frac{u_o}{u_i}=\frac{62{,}5}{41{,}67+62{,}5}=0{,}6 \Rightarrow \boxed{\frac{u_o}{u_i}=0{,}6}$, για $I=600\mu A$.

ζ) $I = 900\ \mu A$

$I_{D_2} = 1mA - 900\mu A = 100\mu A$.

$r_{d1} = \frac{nV_T}{I} = \frac{0,025}{0,0009}\Omega \Rightarrow r_{d1} = 27,78\Omega$, $\quad r_{d2} = \frac{nV_T}{I_{D_2}} = \frac{0,025}{0,0001}\Omega \Rightarrow r_{d2} = 250\Omega$

① $\Rightarrow \frac{u_o}{u_i} = \frac{250}{27,78+250} = 0,9 \Rightarrow \boxed{\frac{u_o}{u_i} = 0,9}$, για $I = 900\ \mu A$.

η) $I = 990\mu A$

$I_{D_2} = 1mA - 990\mu A = 10\mu A$.

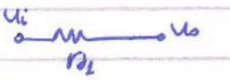
$r_{d1} = \frac{nV_T}{I} = \frac{0,025}{0,00099}\Omega \Rightarrow r_{d1} = 25,25\Omega$, $\quad r_{d2} = \frac{nV_T}{I_{D_2}} = \frac{0,025}{0,00001}\Omega \Rightarrow r_{d2} = 2,5k\Omega$

① $\Rightarrow \frac{u_o}{u_i} = \frac{2500}{25,25+2500} = 0,99 \Rightarrow \boxed{\frac{u_o}{u_i} = 0,99}$, για $I = 990\ \mu A$.

θ) $I = 1mA$

$I = 1mA$, άρα $I_{D_2} = 0\mu A$ και η D_2 δεν άγει.

$r_{d1} = \frac{nV_T}{I} = \frac{0,025}{0,001}\Omega \Rightarrow r_{d1} = 25\Omega$, $\quad r_{d2} = \frac{nV_T}{I_{D_2}} = \infty$:



(η $r_{d2} = \infty$ είναι ανοιχτοκύκλωμα)

Η r_{d1} δε διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, άρα $i(r_{d1}) = 0 = \frac{\Delta V}{r_{d1}} \Rightarrow \Delta V = 0 \Rightarrow u_o = u_i$.

Άρα, $\boxed{\frac{u_o}{u_i} = 1}$, για $I = 1mA$.

Όπως είδαμε από τους υπολογισμούς στα παραπάνω ερωτήματα, για DC ρεύμα σε κάθε δίοδο με $I_D > 10\mu A$, θα έχουμε αντίσταση της αντίστοιχης διόδου $r_d < 2,5k\Omega$ (αφού είδαμε ότι για $I = 10\mu A$ η δίοδος D_1 είχε $r_{d1} = 2,5k\Omega$ και όσο αυξανόταν το I, η r_{d1} μειωνόταν). Αυτό προκύπτει και από τη σχέση: $r_d = \frac{nV_T}{I_D} \le \frac{nV_T}{10\mu A} = \frac{0,025}{0,00001}\Omega = 2,5k\Omega$.

Θεωρούμε ρεύματα I_{D_1} και I_{D_2} στις διόδους, με $I_{D_1}, I_{D_2} > 10\mu A$ (όπως αναφέρεται στο τελευταίο ερώτημα της άσκησης). Βάσει του Σχήματος 3'' θα ισχύει, ακόμη, $I_{D_1} + I_{D_2} = 1mA$.

Έτσι, $r_{d1} = \frac{nV_T}{I_{D_1}}$ και $r_{d2} = \frac{nV_T}{I_{D_2}}$.

Θέλουμε $i_{d1} \le 0,1 \cdot I_{D_1}$ και $i_{d2} \le 0,1 \cdot I_{D_2} \Rightarrow i_{d1max} = 0,1 \cdot I_{D_1}$ και $i_{d2max} = 0,1 \cdot I_{D_2}$.

Από το Σχήμα 3' (βλ. σελ. 4) θα έχουμε διαδοχικά:

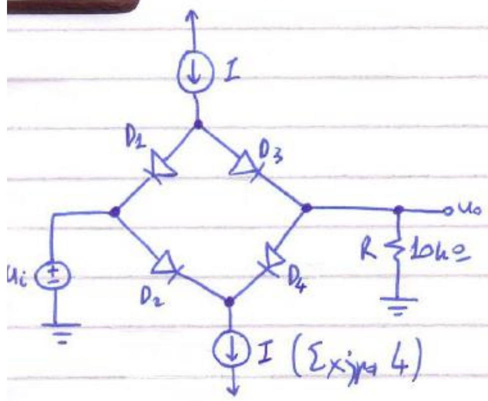
$U_{d2} = U_a = i_{d2} \cdot r_{d2}$ ②, $\quad U_{d1} = i_{d1} \cdot r_{d1} = U_i - U_a$ ③

Άρα, ③ $\Rightarrow U_i = U_a + i_{d1} \cdot r_{d1} \overset{②}{=} i_{d2} r_{d2} + i_{d1} \cdot r_{d1} \Rightarrow U_{imax} = i_{d2max} \cdot r_{d2} + i_{d1max} \cdot r_{d1} \Rightarrow$

$\Rightarrow U_{imax} = 0,1 \cdot \cancel{I_{D_2}} \cdot \frac{nV_T}{\cancel{I_{D_2}}} + 0,1 \cdot \cancel{I_{D_1}} \cdot \frac{nV_T}{\cancel{I_{D_1}}} = (0,1 \cdot 0,025 + 0,1 \cdot 0,025)V \Rightarrow \boxed{U_{imax} = 5mV}$.

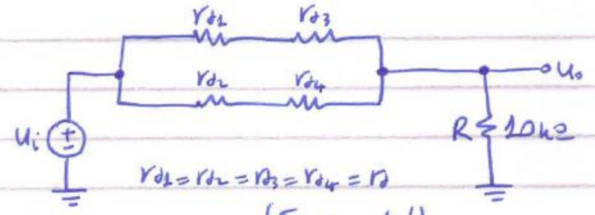
Δημήτριος Ζάρρας

Άσκηση 4 – Πρόβλημα 3.57



(Σχήμα 4)

Το ισοδύναμο κύκλωμα για την προσέγγιση ασθενούς σήματος θα είναι:



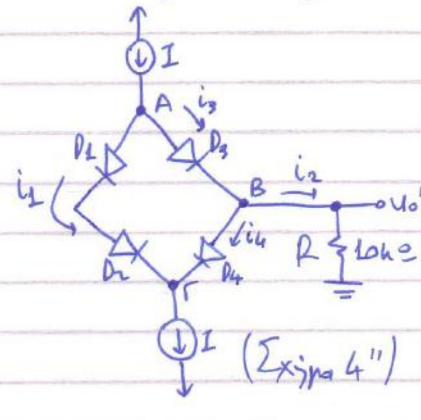
$r_{d1} = r_{d2} = r_{d3} = r_{d4} = r_d$

(Σχήμα 4')

α) Για μικρά σήματα εισόδου ($u_i \le 10mV$) θα έχουμε από το σχήμα 4':

$$u_o = \frac{R}{R+\left[(r_{d1}+r_{d3})//(r_{d2}+r_{d4})\right]} = \frac{R}{R+(2r_d//2r_d)} = \frac{R}{R+r_d} \quad ①$$

Στην DC ανάλυση του Σχήματος 4 θα είναι:



(Σχήμα 4'')

Ν.Ρ.Κ. στο Α: $I = i_1 + i_3$ ①

Ν.Ρ.Κ. στο Β: $i_3 = i_2 + i_4$ ②

Ν.Ρ.Κ. στο Γ: $I = i_1 + i_4$ ③

①,③ $\Rightarrow i_3 = i_4$ ④

② $\xrightarrow{④} i_2 = 0$

Και επειδή οι D_i, $i=1,2,3,4$ είναι πανομοιότυπες θα είναι $i_1 = i_3 = i_4 = \frac{I}{2}$ (αφού $i_2 = 0$, το I σπάει σε ίσα μέρη $\frac{I}{2}$ στον κόμβο Α).

$$① \Rightarrow u_o = u_i \cdot \frac{R}{R+\frac{nV_T}{\frac{I}{2}}} = u_i \frac{10000}{10000+\frac{0{,}05}{I}} \Rightarrow \frac{u_o}{u_i} = \frac{10000}{10000+\frac{0{,}05}{I}} \quad ②$$

Για τις διάφορες τιμές του I προκύπτει ο επόμενος πίνακας (βλ. σελ. 8) για τις τιμές του λόγου μετάδοσης ασθενούς σήματος u_o/u_i:

I	$\frac{u_o}{u_i}$
$0\,\mu A$	0
$1\,\mu A$	0,167
$10\,\mu A$	0,667
$100\,\mu A$	0,952
$1\,mA$	0,995
$10\,mA$	0,9995

(β) Το ρεύμα σήματος περιορίζεται στο 10% του DC ρεύματος πόλωσης, όταν: $i_d = \pm 0{,}1\cdot I_D$ (5)
και επειδή: $i_D(t) = I_D + i_d \overset{(5)}{\Rightarrow} i_D(t) = I_D \pm 0{,}1\cdot I_D \Rightarrow$

$$\Rightarrow i_D(t) = 0{,}9\cdot I_D \text{ έως } 1{,}1\cdot I_D \quad (6)$$

Από τη σχέση (3.12) του βιβλίου είναι $i_D(t) = I_D\cdot e^{u_d/nV_T} \Rightarrow$

$$\left.\begin{aligned} &\Rightarrow \frac{i_D}{I_D} = e^{u_d/nV_T} \\ &(6) \Rightarrow \frac{i_D}{I_D} = 0{,}9 \text{ έως } 1{,}1 \end{aligned}\right\} \Rightarrow e^{u_d/nV_T} = 0{,}9 \text{ έως } 1{,}1$$

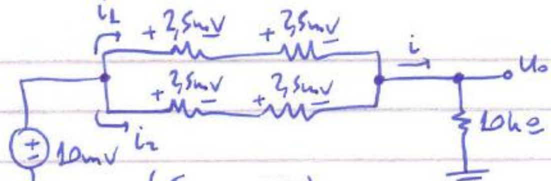
Άρα,

$$\left.\begin{aligned} &u_d = nV_T\cdot \ln(0{,}9) = 0{,}025\cdot(-0{,}10536)V \\ &\text{έως} \\ &u_d = nV_T\cdot \ln(1{,}1) = 0{,}025\cdot 0{,}0953\,V \end{aligned}\right\} \Rightarrow u_d = \begin{cases} -2{,}63mV \\ \text{έως} \\ 2{,}38mV \end{cases}.$$

Δηλαδή, είναι περίπου $u_d = \begin{cases} -2{,}5mV \\ \text{έως} \\ 2{,}5mV \end{cases}$.

Επομένως, για μια τέτοια πολωμένη δίοδο που άγει, η μεγαλύτερη τιμή τάσης σήματος που μπορεί να υποστηρίξει περιορίζεται περίπου στα $\boxed{U_{d_{max}} = 2{,}5mV}$ (ακριβέστερα 2,38 mV), ώστε ταυτόχρονα το αντίστοιχο ρεύμα σήματος να βρίσκεται στο ±10% του DC ρεύματος.

Για μέγιστη είσοδο $U_{i_{max}} = 10mV$, με τα ρεύματα των διόδων να παραμένουν εντός του ±10% της DC τιμής τους, το ισοδύναμο κύκλωμα για την προσέγγιση ασθενούς σήματος μπορεί, βάσει των προηγούμενων συμπερασμάτων, να γίνει (βλ. σελ. 9):

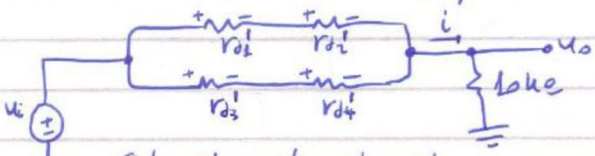


(Σχήμα 4''')

Προκύπτει άμεσα από τις πτώσεις τάσης στις αντιστάσεις ότι $u_o = 5mV$.
Άρα, $i = \frac{5mV}{10k\Omega} = \frac{0{,}005}{10000} A \Rightarrow i = 0{,}5\mu A$.

Επειδή οι αντιστάσεις ασθενούς σήματος είναι πανομοιότυπες μεταξύ τους προκύπτει $i_1 = i_2 = \frac{i}{2}$ δηλαδή η κάθε δίοδος διαρρέεται από ρεύμα σήματος πλάτους 0,25μA. Για να αποτελούν τα 0,25μA το πολύ το 10% της DC τιμής του ρεύματος της κάθε διόδου, το DC ρεύμα για την κάθε δίοδο θα είναι 2,5μA τουλάχιστον, αφού $0{,}25\mu A \le \frac{I_D}{10} \Leftrightarrow I_D \ge 2{,}5\mu A$.
Επομένως, το I που ισούται με το διπλάσιο του DC ρεύματος που διαρρέει την κάθε δίοδο θα είναι $I = 2\cdot I_D \Rightarrow I \ge 5\mu A \Rightarrow \boxed{I_{min} = 5\mu A}$.

(δ) Είναι $I = 1mA$, όπως κάθε δίοδος του σχήματος (Σχήμα 4) είδαμε ότι διαρρέεται από DC ρεύμα ίσο με $I_D = \frac{I}{2} = 0{,}5mA$.
Για να είναι $i_D \le 0{,}1\cdot I_D \Rightarrow i_D \le 0{,}05mA$, θα έχουμε στο παρακάτω Σχήμα 4'' ότι $i_{max} = 2\cdot i_{D_{max}} = 0{,}1mA$.



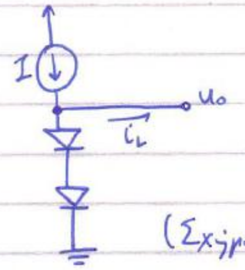
$r_{d1}' = r_{d2}' = r_{d3}' = r_{d4}' = r_d'$

Οπότε, $u_{o_{max}} = i\cdot 10k\Omega = 0{,}0001\cdot 10000 V \Rightarrow \boxed{u_{o_{max}} = 1V}$.

Τώρα, $r_d' = \frac{nV_T}{I_D} = \frac{0{,}025}{0{,}0005}\Omega = 50\Omega$, η κάθε μία με $u_{d_{max}} = i_{d_{max}} r_d' = 0{,}00005\cdot 50V$
$\Rightarrow u_{d_{max}} = 0{,}0025V$.

Άρα, από το σχήμα: $u_{i_{max}} = u_{o_{max}} + 2\cdot u_{d_{max}} = 1V + 0{,}005V \Rightarrow$
$\Rightarrow \boxed{u_{i_{max}} = 1{,}005V}$.

Άσκηση 5 – Πρόβλημα **3.62**

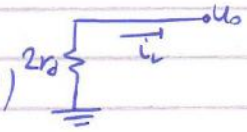


$i_L = 2mA$ έως $7mA$.
$I = 5mA$ ή $10mA$ ή $15mA$.
$u_o = 1,5V + \Delta u_o$.

(Σχήμα 5)

Για να κυμαίνεται το i_L από $2mA$ έως $7mA$ θα πρέπει, προφανώς, $I > 7mA$.
Άρα, απορρίπτεται η επιλογή της πηγής σταθερού ρεύματος των $5mA$.

Το ισοδύναμο κύκλωμα ασθενούς σήματος θα είναι:

(Σχήμα 5')


Για το ρεύμα φορτίου έχουμε $i_L = 2mA$ έως $7mA$, οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε $i_L = (4,5 \pm 2,5)\,mA$.
Λαμβάνουμε, δηλαδή, μια κεντρική τιμή για το i_L ίση με $4,5mA$.

Είναι $r_d = \frac{nV_T}{I_D}$, όπου $I_D = I - i_L$ (1)

Βλέπουμε ότι η έξοδος τραβάει ρεύμα περίπου ίσο με $4,5mA$, οπότε το ρεύμα I_D που διαρρέει τις διόδους μειώνεται κατά αυτό το ποσό. Σαν αποτέλεσμα, η τάση στα άκρα των εν σειρά συνδεδεμένων διόδων μειώνεται κατά ένα ποσό ίσο με:

$$\Delta u_o = -4,5 \cdot r \xlongequal{r=2r_d} -4,5 \cdot 2\,\frac{nV_T}{I_D} \overset{(1)}{\Rightarrow} \Delta u_o = -9 \cdot \frac{nV_T}{I - i_L} \quad (2)$$

• για $I = 10mA$:

$$(2) \Rightarrow \Delta u_o = -9 \cdot \frac{2 \cdot 25}{10 - 4,5}\,mV \Rightarrow \boxed{\Delta u_o = -81,82\,mV} \text{ για } I = 10mA$$

και $\frac{\Delta u_o}{i_L} = \frac{-81,82\,mV}{4,5\,mA} \Rightarrow \frac{\Delta u_o}{i_L} = -18,2\,\frac{mV}{mA}$.

• για $I = 15mA$:

$$(2) \Rightarrow \Delta u_o = -9 \cdot \frac{2 \cdot 25}{15 - 4,5}\,mV \Rightarrow \boxed{\Delta u_o = -42,86\,mV} \text{ για } I = 15mA$$

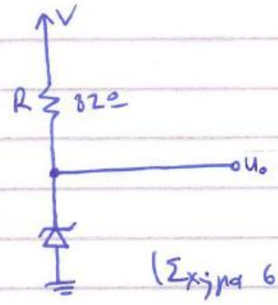
και $\frac{\Delta u_o}{i_L} = \frac{-42,86\,mV}{4,5\,mA} \Rightarrow \frac{\Delta u_o}{i_L} = -9,5\,\frac{mV}{mA}$.

Δημήτριος Ζάρρας

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι προκαλείται μικρότερη μεταβολή στην τάση εξόδου (lower load regulation) στην περίπτωση της πηγής $I = 15\,mA$. Συνεπώς, για το σκοπό να επιθυμούμε να εξυπηρετηθεί, ο οποίος δεν είναι άλλος από την σταθεροποίηση της τάσης εξόδου (μικρότερη δυνατή απόκλιση Δu_o) <u>η καταλληλότερη πηγή σταθερού ρεύματος είναι αυτή των 15 mA.</u>

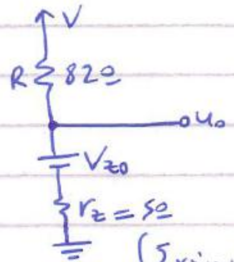
Ένα προφανές μειονέκτημα της πηγής των 15 mA έναντι των 10 mA είναι ότι απαιτεί περισσότερο ρεύμα. Ωστόσο την επιλέγουμε, αφού επιφέρει καλύτερη σταθεροποίηση της u_o.

Άσκηση 6 – Πρόβλημα **3.66**



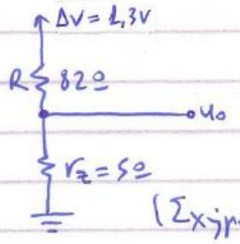
(Σχήμα 6)

Αντικατάσταση της διόδου zener με το ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο της:



(Σχήμα 6')

Από το Σχήμα 6' παίρνουμε το ισοδύναμο κύκλωμα ασθενούς σήματος:



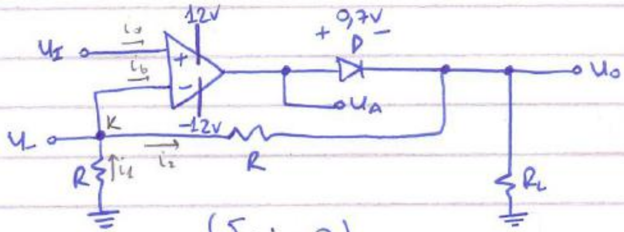
(Σχήμα 6'')

Η μεταβολή της αρχικής τάσης τροφοδοσίας προκαλεί, λοιπόν, αλλαγή της u_o του σταθεροποιητή ίση με:

$$\Delta u_o = \Delta V \cdot \frac{r_z}{R + r_z} = 1,3 \cdot \frac{5}{82+5}\ V \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta u_o = 0,0747\ V \Rightarrow \boxed{\Delta u_o = 74,7\ mV}.$$

Άσκηση 7 — Πρόβλημα **3.91**



(Σχήμα 7)

Ο τελεστικός ενισχυτής είναι ιδανικός, άρα $i_a = i_b = 0$.

Οπότε στον κόμβο K, από Ν.Ρ.Κ.: $i_1 = i_2$ ①

Είναι, $u_K = -i_1 R$ ②

Όμως, $u_K = u_I \overset{②}{\Rightarrow} u_I = -i_1 R$ ③

Ακόμη, $u_K - u_o = i_2 R \Rightarrow u_o = u_K - i_2 R \overset{②}{=} -i_1 R - i_2 R \xrightarrow{i_1 = i_2} u_o = -2 i_1 R$ ④

$\dfrac{④}{③} \Rightarrow \dfrac{u_o}{u_I} = 2 \Rightarrow u_o = 2u_I$ ⑤ (οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν όταν $u_I > 0$).

(α) $u_I = 1V$, άρα $u_- = u_K = u_I \Rightarrow \boxed{u_- = 1V}$. $⑤ \Rightarrow u_o = 2 \cdot 1V \Rightarrow \boxed{u_o = 2V}$.
Επίσης, $u_A = u_o + 0,7V \Rightarrow \boxed{u_A = 2,7V}$.

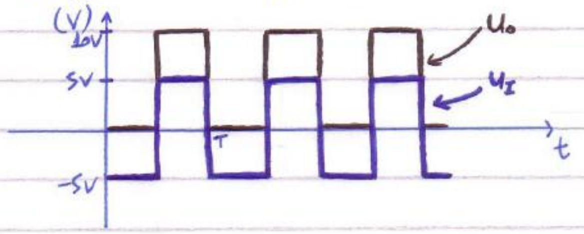
(β) $u_I = 2V$, άρα $u_- = u_K = u_I \Rightarrow \boxed{u_- = 2V}$. $⑤ \Rightarrow u_o = 2 \cdot 2V \Rightarrow \boxed{u_o = 4V}$.
Επίσης, $u_A = u_o + 0,7V \Rightarrow \boxed{u_A = 4,7V}$.

(γ) $u_I = -1V < 0$, άρα η έξοδος του op-amp θα βρεθεί στην αρνητική στάθμη κορεσμού με $\boxed{u_A = -12V}$. Η δίοδος πολώνεται ανάστροφα, άρα είναι σε αποκοπή και ο op-amp είναι σε λειτουργία ανοικτού βρόχου. Οπότε, η R_L δε διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα και θα έχει $i_{R_L} = 0 \Rightarrow$ $\Rightarrow \dfrac{V_{R_L}}{R_L} = 0 \Rightarrow V_{R_L} = 0 \Rightarrow \boxed{u_o = 0V}$ (αφού λόγω του ανοικτοκυκλώματος στη δίοδο είναι $i_{R_L} = i_2 = i_1 = 0$, γιατί χάνεται η ανάδραση και με $i_b = 0$ δημιουργείται ένα κύκλωμα των κλάδων με σειρές τις αντιστάσεις R, R, R_L και άρα, μηδενικά αντίστοιχα ρεύματα). Άρα, με $i_1 = 0$ είναι, ομοίως με την περίπτωση της R_L, $u_K = 0 \Rightarrow \boxed{u_- = 0V}$

(δ) Κατά όμοιο τρόπο με την περίπτωση του προηγούμενου ερωτήματος (ερώτημα (γ)), θα είναι τώρα για $u_I = -2V < 0$ πάλι $\boxed{u_A = -12V}$, $\boxed{u_o = 0V}$ και $\boxed{u_- = 0V}$.

Δημήτριος Ζάρρας

Αν θεωρήσουμε ότι η U_I είναι ένα συμμετρικό τετραγωνικό κύμα, συχνότητας 1kHz, πλάτους 5V και μηδενικής μέσης τιμής, τότε προφανώς, στα διαστήματα που $U_I = 5V > 0$ η σχέση (5) δίνει: $U_o = 2 \cdot U_I = 2 \cdot 5V = 10V$, ενώ όταν $U_I = -5V < 0$, θα είναι: $U_o = 0V$, όπως εξηγήσαμε στο ερώτημα (γ). Άρα:



Προφανώς θα είναι $\boxed{\langle U_o \rangle = 5V}$.

Αυτό προκύπτει και από τη σχέση:

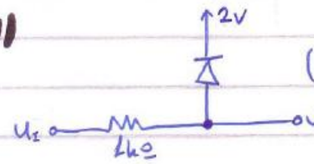
$$\langle U_o \rangle = \frac{1}{T}\int_{(T)} U_o(t)\,dt = \frac{1}{T}\int_0^{T/2} \cancel{0 \cdot dt} + \frac{1}{T}\int_{T/2}^{T} 10 \cdot dt = \frac{10}{T}\left[t\right]_{T/2}^{T} =$$

$$= \frac{10}{T}\left(T - \frac{T}{2}\right) = \frac{10}{\cancel{T}}\frac{\cancel{T}}{2}\,(V) = 5V.$$

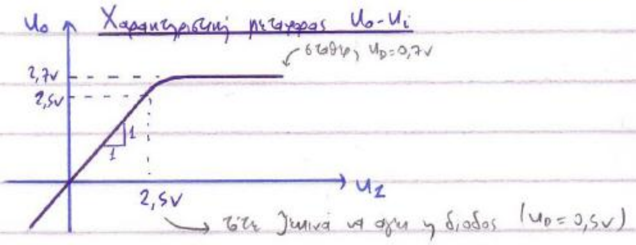
Άσκηση 8 – Πρόβλημα 3.93

Οι ανάλογες δίοδοι αρχίζουν να άγουν σε πτώση τάσης 0,5V κατά την ορθή πόλωση και παρουσιάζουν πτώση τάσης 0,7V όταν άγουν πλήρως.

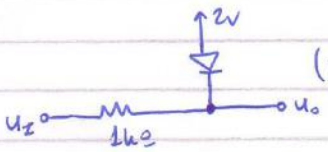
(α)



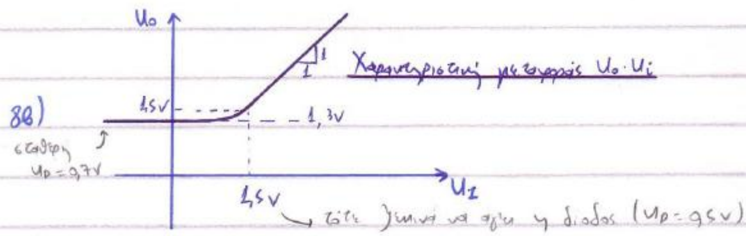
(Σχήμα 8α)



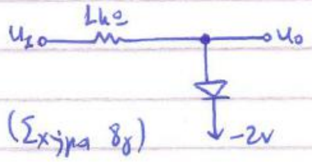
(β)



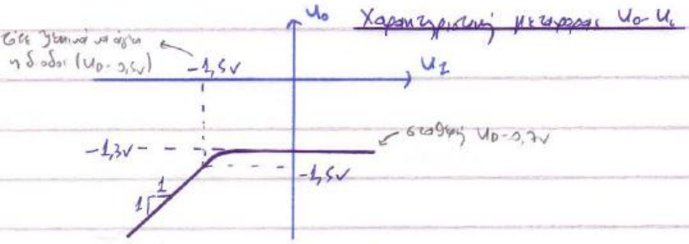
(Σχήμα 8β)



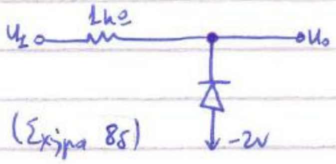
(γ)



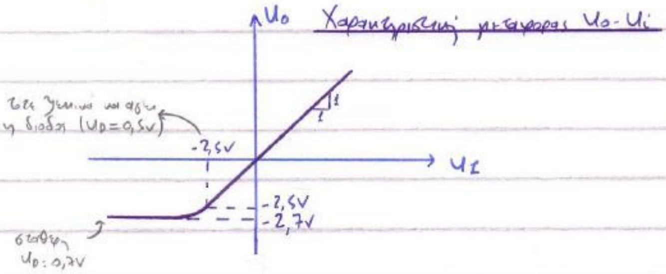
(Σχήμα 8γ)



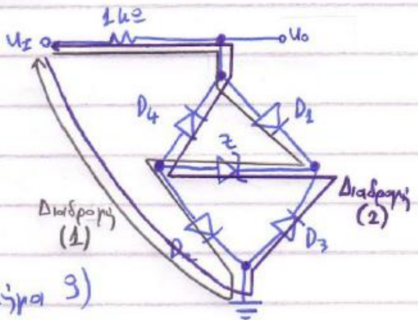
(δ)



(Σχήμα 8δ)

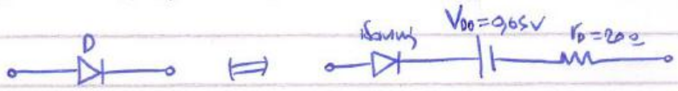


Άσκηση 9 – Πρόβλημα 3.97

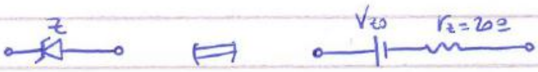


(Σχήμα 9)

Για τις διόδους D_1, D_2, D_3, D_4 το ισοδύναμο κύκλωμα του τμηματικά γραμμικού μοντέλου θα είναι:



ενώ για τη δίοδο zener, Z, θα είναι:



Τα 8,2V της τάσης zener μετρούνται στα 10mA. Άρα, είναι:

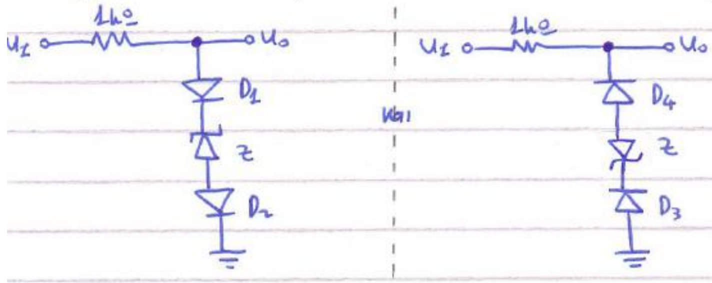
$$V_Z = V_{Z0} + r_Z \cdot I_Z \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{Z0} = V_Z - r_Z \cdot I_Z = (8,2 - 20 \cdot 0,01)V \Rightarrow V_{Z0} = 8V.$$

Παρόμοια με τον ανορθωτή πλήρους κύματος, το ρεύμα του Σχήματος 9 μπορεί να ρέει στις διαδρομές (1) ή (2) του σχήματος. Στην (1) είναι, D_1, D_2, Z : ON και D_3, D_4 : OFF, ενώ στη (2) είναι D_3, D_4, Z : ON και D_1, D_2 : OFF.

Οι διαδρομές (1) και (2) του Σχήματος 9 μπορούν να δώσουν τα ακόλουθα σχήματα, από τα οποία αντλούμε σημαντική πληροφορία:

(Σχήμα 9') – Διαδοχής (1) | (Σχήμα 9'') – Διαδοχής (2)



Επομένως, κοιτώντας το αρχικό κύκλωμα του Σχήματος 9 από τη σύνθεση των 9' και 9'' βλέπουμε ότι μπορούμε να αναλύσουμε δύο απλούστερους ψαλιδιστές.

Στο Σχήμα 9', οι δίοδοι θα αρχίσουν να άγουν, όταν $U_I = V_{D0} + V_{Z0} + V_{D0} =$

$= 2V_{D0} + V_{Z0} =$

$= (2\cdot 0,65 + 8)V \Rightarrow$

$\Rightarrow$ όταν $U_I = 9,3V$.

Αντιθέτως, στο Σχήμα 9'', οι δίοδοι θα αρχίσουν να άγουν, όταν $U_I = -V_{D0} - V_{Z0} - V_{D0} =$

$= -2V_{D0} - V_{Z0} =$

$= (-2\cdot 0,65 - 8)V \Rightarrow$

$\Rightarrow$ όταν $U_I = -9,3V$.

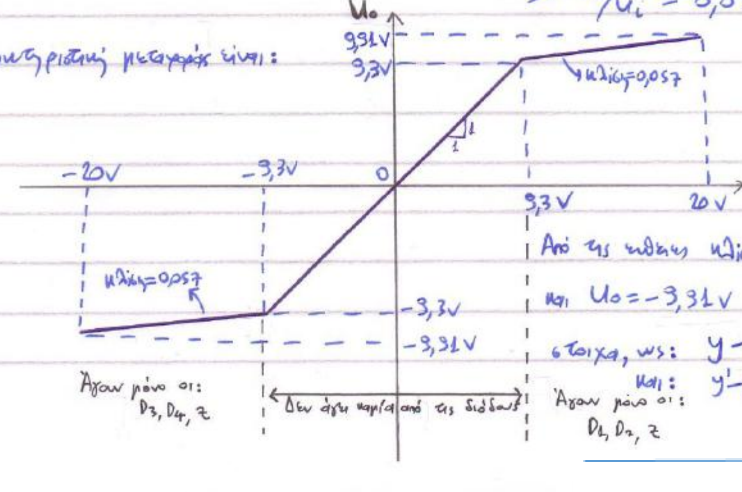
Δηλαδή, στο διάστημα $-9,3V < U_I < 9,3V$ όλες οι δίοδοι είναι "off" (δεν άγουν).

Όμως, για διαστήματα $U_I \leq -9,3V$ και $U_I \geq 9,3V$, από οποιοδήποτε από τα αντίστοιχα δύο σχήματα προκύπτει με διαιρέτη τάσης ότι:

$$U_o = U_I \cdot \frac{r_D + r_Z + r_D}{1000 + r_D + r_Z + r_D} \Rightarrow \frac{U_o}{U_I} = \frac{3\cdot 20}{1000 + 3\cdot 20} = \frac{60}{1060}$$

$\Rightarrow U_o/U_I = 0,057$, για $U_I \leq -9,3V$ και $U_I \geq 9,3V$.

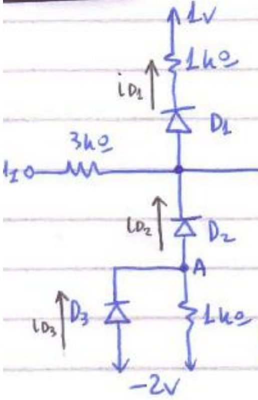
Οπότε, η χαρακτηριστική μεταφοράς είναι:



Από τις ευθείες κλίσης 0,057 υπολογίζεται $U_o = 9,31V$ και $U_o = -9,31V$ για $U_I = 20V$ και $U_I = -20V$ αντίστοιχα, ως: $y - 9,3 = 0,057\cdot(20 - 9,3) \Rightarrow y = 9,31$

και: $y' - (-9,3) = 0,057\cdot(-20 - (-9,31)) \Rightarrow y = -9,31$

Άσκηση 10 — Πρόβλημα 3.103



(Σχήμα 10)

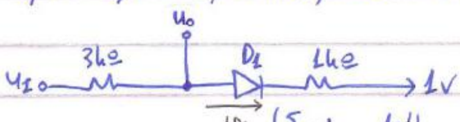
Οι δίοδοι είναι στοιχεία 1mA, δηλαδή επιδεικνύουν πτώση τάσης 0,7V σε ρεύμα 1mA, με $n=1$.

Άρα, είναι: $i_D = I_S \cdot e^{V_D/nV_T} \Rightarrow I_S = i_D \cdot e^{-V_D/nV_T} = 0{,}001 \cdot e^{-0{,}7/0{,}025}$ A

$\Rightarrow I_S = 6{,}914 \cdot 10^{-16}$ A.

• Παρατηρούμε, ότι λόγω των D_2 και D_3, το κάτω τμήμα του κυκλώματος δημιουργεί ψαλιδισμό της U_o στα $-3{,}4V$ (προκύπτει από τα $-2V \underbrace{-0{,}7V-0{,}7V}_{\text{από τις } D_2, D_3} = -3{,}4V$) διατηρώντας σταθερή τη U_o στα Volt αυτά.

Για πιο μεγάλες τιμές της U_I, τέτοιες, ώστε να άγει μόνο η D_1, θα είναι:



(Σχήμα 10')

Από το Σχήμα 10' προκύπτει ότι: $U_o = 0{,}7 + i_{D1} \cdot 1000 + 1$ (V) $\quad \left(i_{D1} = \frac{U_I - 1{,}7}{4000}\right)$

$\Rightarrow U_o = 1{,}7 + \frac{U_I - 1{,}7}{4000} \cdot 1000$ (V) $\Rightarrow$

$\Rightarrow U_o = 1{,}7 + \frac{U_I}{4} - \frac{1{,}7}{4}$ (V) $\Rightarrow U_o = \frac{U_I}{4} + 1{,}28$ ①

Από τις ανωτέρω δύο παρατηρήσεις εξάγεται το συμπέρασμα, ότι στην ακραία τιμή των −10V, η κλίση της χαρακτηριστικής μεταφοράς είναι **μηδενική** (σταθερή, $U_o = -3{,}4V$) και ότι στην ακραία τιμή των +10V, η κλίση της χαρακτηριστικής μεταφοράς είναι $\frac{1}{4}$ (αφού, τότε $U_o = \frac{U_I}{4} + 1{,}28$).

Η ① για $U_I = 10V$ δίνει $U_o = 3{,}78V$

- Από την ①: $U_o = \frac{U_I}{4} + 1{,}28$ (V) μπορούν να υπολογιστούν τιμές της U_o για τιμές της U_I, κατά τις οποίες άγει μόνο η D_1.

Τώρα, για τιμές της U_I, κατά τις οποίες άγουν μόνο οι D_2 και D_3 μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα εξής:

Από το σχήμα, $V_{D3} = -2 - V_A$ ②

Επίσης, $i_{D3} = I_S \cdot e^{V_{D3}/0{,}025}$ (3) (για $I_S = 6{,}314 \cdot 10^{-16}$ A, όπως βρέθηκε στην αρχή)

Από N.P.K. στο A : $i_{D2} = i_{D3} + \frac{V_A + 2}{1000}$ (4)

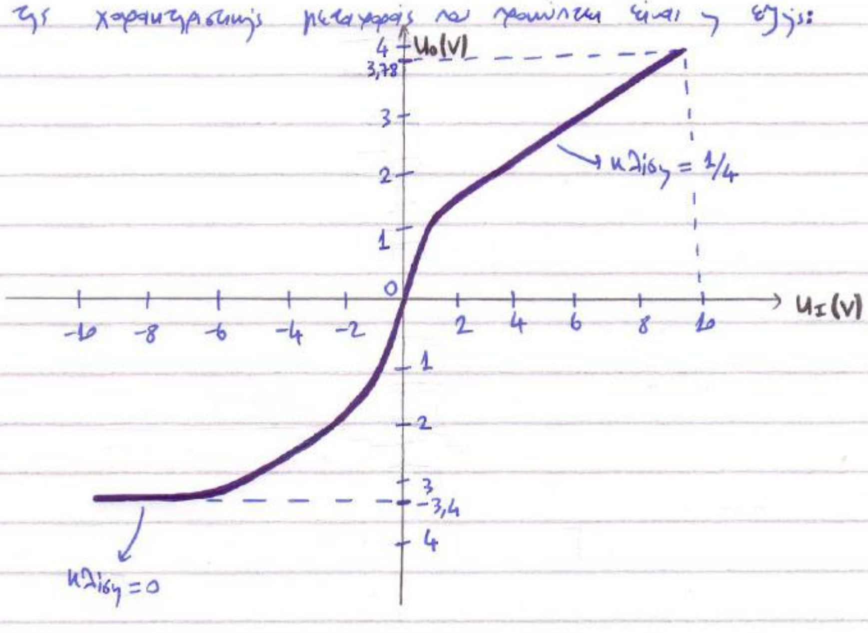
Για τη D_2 είναι $V_{D2} = 0{,}025 \cdot \ln \frac{i_{D2}}{I_S}$ (5) (για $I_S = 6{,}314 \cdot 10^{-16}$ A, όπως βρέθηκε στην αρχή)

Από το σχήμα πάλι, $V_{D2} = V_A - u_O \Rightarrow u_O = V_A - V_{D2}$ (6)

και αφού $i_{D1} = 0$, προκύπτει $u_I = u_O - i_{D2} \cdot 3000$ (7)

- Από τις σχέσεις (2) έως (7) μπορούν να υπολογιστούν τιμές της u_O για τιμές της u_I, κατά τις οποίες άγουν μόνο οι D_2 και D_3.

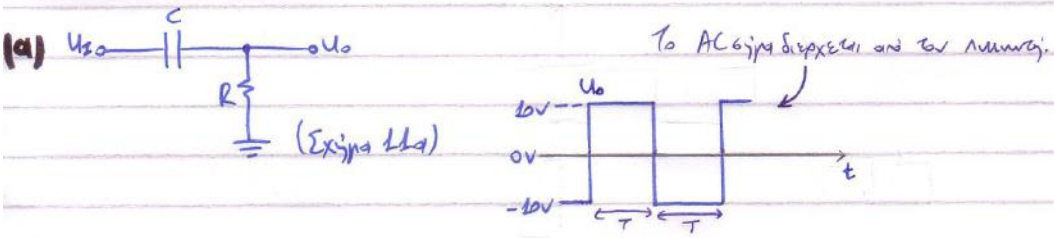
Η μορφή της χαρακτηριστικής μεταφοράς που προκύπτει είναι η εξής:



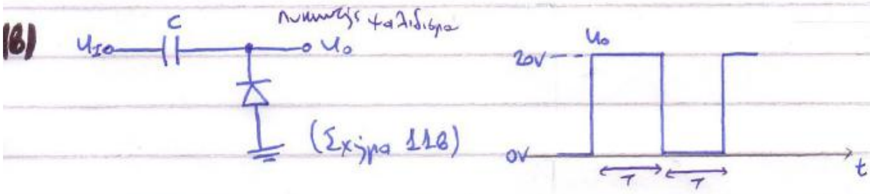
Δημήτριος Ζάρρας

ΠΡΟΑΙΡΕΤΙΚΗ Άσκηση 11 – Πρόβλημα 3.105

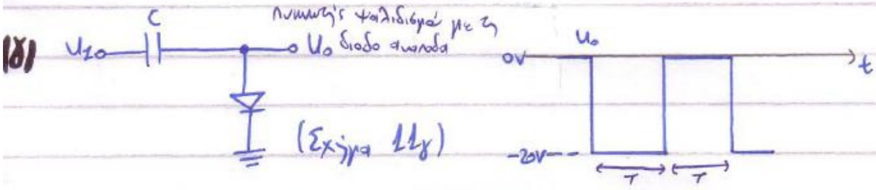
(α)



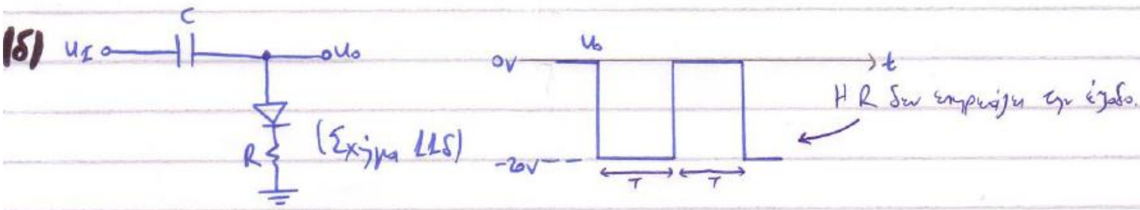
(β)



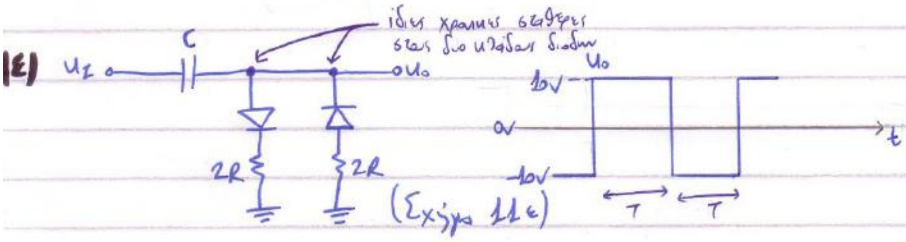
(γ)



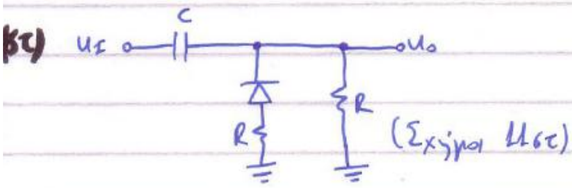
(δ)



(ε)



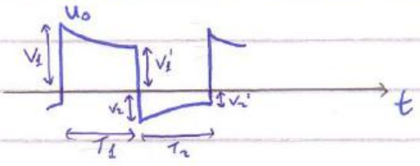
(στ)



Εδώ, στον έναν κατακόρυφο κλάδο του σχήματος έχουμε τη δίοδο μαζί με την αντίσταση, και στον άλλο μόνο την αντίσταση.
Επομένως, το κύκλωμα του ερωτήματος έχει παρόμοια

Δημήτριος Ζάρρας

Λειτουργία με αυτό του Σχήματος 3.37 του βιβλίου.
Άρα, θα είναι σε γενική μορφή:



Στο χρονικό διάστημα διάρκειας T_1 έχουμε εκφόρτιση του πυκνωτή στην αντίσταση R και άρα,
$u_o = V_1 e^{-T_1/RC} \xRightarrow{T_1=T} u_o = V_1 e^{-T/RC}$ (1)

Είναι, ακόμη, από Θ. Taylor στο σημείο όπου $u_o = V_1'$: $V_1' \simeq V_1\left(1-\frac{T}{RC}\right)$ (2)

Στο χρονικό διάστημα διάρκειας T_2 έχουμε φόρτιση του πυκνωτή, κατά την οποία όμως η δίοδος του Σχήματος 11.62 άγει και συνεπώς, προκύπτει παράλληλη σύνδεση των δύο αντιστάσεων R, που με σύνθεση δίνουν $R_{ολ} = R//R = \frac{R}{2} \Rightarrow R_{ολ} = R/2$.
Βλέπουμε, λοιπόν, ότι στα χρονικά διαστήματα T_1 και T_2 εμπλέκονται δύο διαφορετικές χρονικές σταθερές.
Άρα, θα είναι και: $|u_o| = |V_2| e^{-T_2/\frac{R}{2}C} \xRightarrow{T_2=T} |u_o| = |V_2| e^{-2T/RC}$ (3)

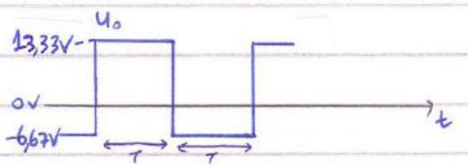
Πάλι είναι: $|V_2'| \simeq |V_2|\left(1-\frac{2T}{RC}\right)$ (4) από Θ. Taylor στο σημείο όπου $u_o = V_2'$.

(2) $\Rightarrow V_1' \simeq V_1 - V_1\frac{T}{RC}$ (5)
(4) $\Rightarrow |V_2'| \simeq |V_2| - |V_2|\frac{2T}{RC}$ (6) Δίνεται, ακόμη, ότι: $T \ll RC \Rightarrow \frac{T}{RC} \ll 1$ (7)

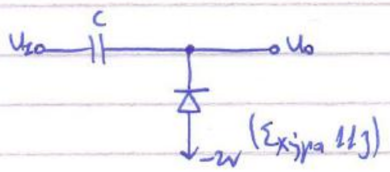
Προφανώς, από το σχήμα είναι $\left.\begin{array}{l} V_1' + |V_2| = 20 \\ \text{και } |V_2'| + V_1 = 20 \end{array}\right\} \xRightarrow{(5),(6)} \left\{\begin{array}{l} V_1 - V_1\frac{T}{RC} + |V_2| = 20 \\ |V_2| - |V_2|\frac{2T}{RC} + V_1 = 20 \end{array}\right\} \xRightarrow{(-)}$

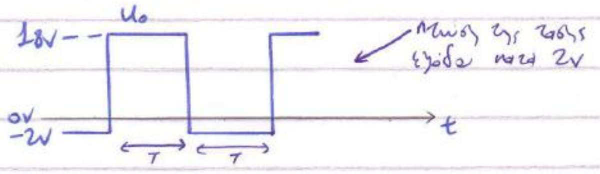
$\Rightarrow V_1 \frac{T}{\cancel{RC}} = |V_2|\frac{2T}{\cancel{RC}} \Rightarrow V_1 = 2|V_2|$ (8) $\left.\right\}$ όμως $V_1' + |V_2| = 20$ $\xrightarrow[\text{λόγω της (7) αγνοείται ο όρος } \frac{T}{RC}]{V_1 \simeq V_1'}$ $3 \cdot |V_2| = 20V \Rightarrow |V_2| = 6{,}67V$ και άρα, $V_1 = 20 - |V_2| \Rightarrow$
$\Rightarrow V_1 = 13{,}33V$

Συνεπώς, η έξοδος θα είναι προσεγγιστικά:

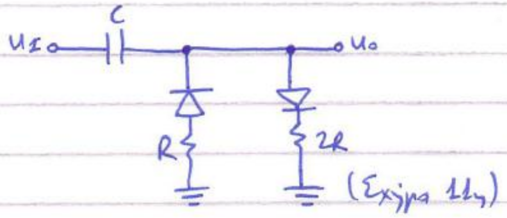


(ζ)





(η)



Εργαζόμενοι με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο εργαστήκαμε στο ερώτημα (στ) θα έχουμε τώρα, για το διάστημα εκφόρτισης:

$$u_o = V_1 e^{-T/2RC} \quad (1)$$

, αφού η εκφόρτιση γίνεται μέσω της 2R.

Άρα, $V_1' \simeq V_1\left(1-\frac{T}{2RC}\right) \quad (2)$

Αντίστοιχα, για το διάστημα φόρτισης:

$$|u_o| = |V_2| e^{-T/RC} \quad (3)$$

, αφού η φόρτιση γίνεται μέσω της R.

Άρα, $|V_2'| \simeq |V_2|\left(1-\frac{T}{RC}\right) \quad (4)$

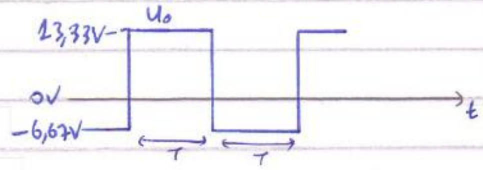
$(2) \Rightarrow V_1' \simeq V_1 - V_1\frac{T}{2RC} \quad (5)$

$(4) \Rightarrow |V_2'| \simeq |V_2| - |V_2|\frac{T}{RC} \quad (6)$

$$\left.\begin{aligned} V_1' + |V_2| &= 20 \\ |V_2'| + V_1 &= 20 \end{aligned}\right\} \xrightarrow{(5),(6)} \left.\begin{aligned} V_1 - V_1\frac{T}{2RC} + |V_2| &= 20 \\ |V_2| - |V_2|\frac{T}{RC} + V_1 &= 20 \end{aligned}\right\} \xrightarrow{(-)} V_1 \frac{\cancel{T}}{2\cancel{RC}} = |V_2|\frac{\cancel{T}}{\cancel{RC}} \Rightarrow V_1 = 2|V_2|.$$

Δηλαδή, προέκυψε πάλι η σχέση (8) του ερωτήματος (στ).

Συνεπώς, η έξοδος θα είναι, πάλι, προσεγγιστικά:
(όπως και στο στ' ερώτημα)



Δημήτριος Ζάρρας