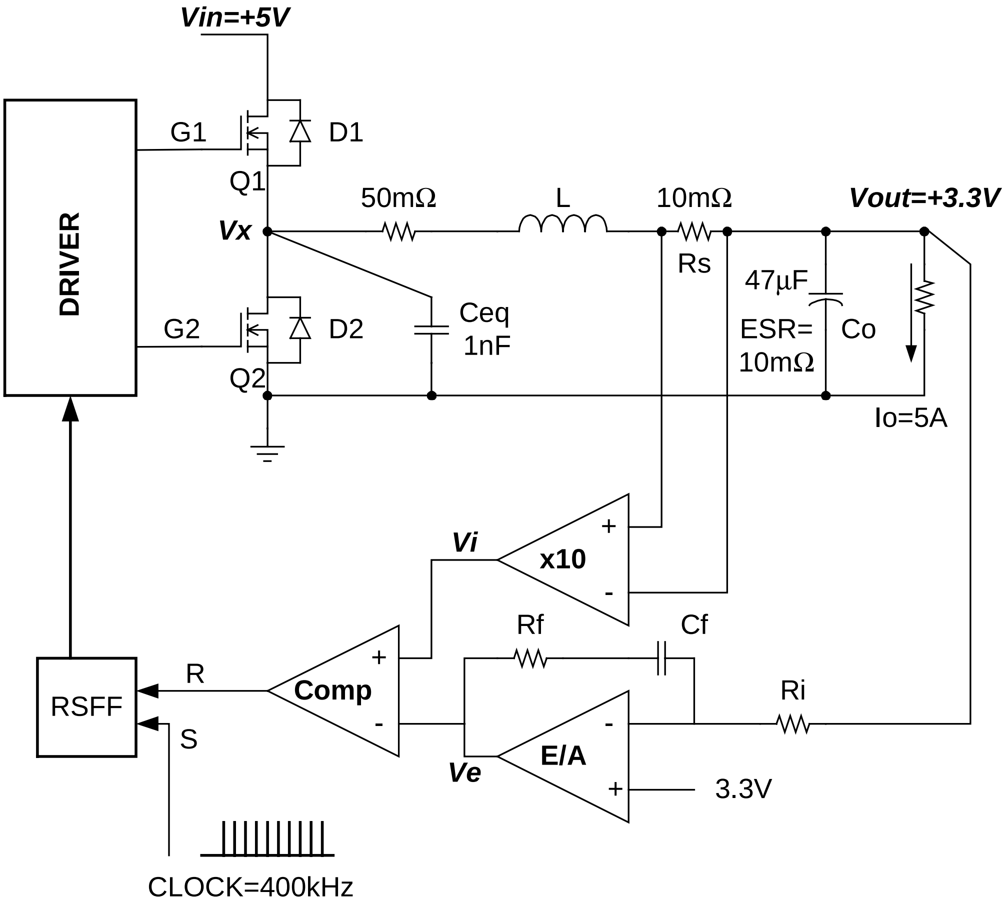
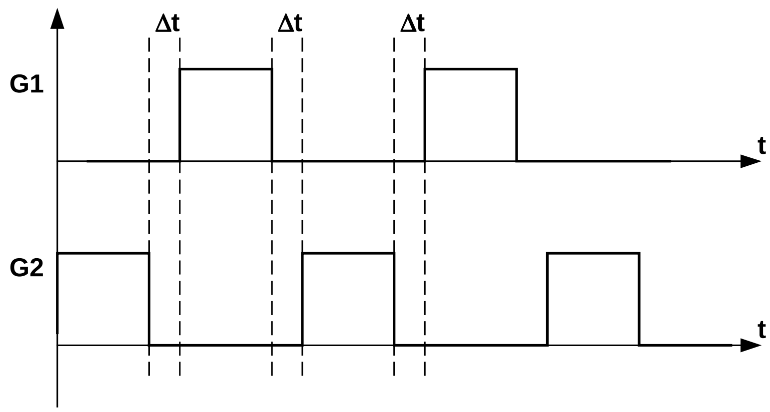
המחלקה להנדסת חשמל
אוניברסיטת בן-גוריון
קורס – "ממירי DC-DC"
361.1.4561

מבחן - מועד א'
6/2/2003

סמסטר א'
תשס"ג (2003)

- כל חומר עזר מותר
- אין להעביר חומר בין הנבחנים
- שימוש במחשבונים כולל מחשב מטלטל מותר





כל השאלות מתייחסות לשרטוט המצורף.
יש לענות על 3 מתוך 4 השאלות הנתונות.

נתון: תדר המיתוג 400kHz
זמן מת בין פולסי השער (dead time Δt) 100ns
$V_{D1}=V_{D2}=0.3V$, $R_{DSon}=0.1\Omega$, $Q_{gate}=30nC$

<u>שאלה מס׳ 1</u>

<u>1.1 (20%)</u>
חשב ערכו של L כך שאדוות הזרם $\Delta I=1A$ בעומס הנומינלי בהזנחת dead time Δt ומפלי המתח במעגל (R_{DSon}, מתחי דיודות).

<u>1.2 (40%)</u>
חשב ושרטט את המתח בנקודה Vx והזרמים דרך הדיודות והטרנזיסטורים בהנחה שזמני המיתוג של הטרנזיסטורים מוזנחים (יש להתחשב ב-dead time). החישוב עבור $\Delta I=1A$.

<u>1.3 (40%)</u>
חשב את הפסדי ההולכה של הטרנזיסטורים בהזנחת Δt . פרט את ההפסדים הנוספים של כל אחד מהטרנזיסטורים בהנחה שהם זהים. איזה יתחמם יותר?

<u>שאלה מס׳ 2</u>

<u>2.1 (33%)</u>
חשב את האדווה במוצא במצב היציב אם $\Delta I=2A$ (בגין ESR ובגין טעינת הקבל).

<u>2.2 (33%)</u>
חשב את הפסדי ״ההולכה״ של קבל מוצא.

<u>2.3 (34%)</u>
חשב את הזרם הדרוש בשערי הטרנזיסטורים (בהנחה שהוא קבוע בזמן הטעינת השער) כך שזמן העליה יהיה 50ns.

<u>שאלה מס' 3</u>

<u>3.1 (30%)</u>

חשב AP של הסליל אם $\Delta I=1A$, $K=0.5$, $Bmax=0.3T$, $J=4A/mm^2$.

<u>3.2 (30%)</u>

הסבר כיצד ניתן לחשב התנגדות DC של חוט הסליל שחושב בסעיף 3.1 בהנחה שהגוף נבחר מהקטלוג והמוליכות הסגולית של חומר החוט ידועה.

<u>3.3 (40%)</u>

חשב את הפסדי הסליל אם התנגדות החוט $50m\Omega$ והפסדי הגרעין :

$P_{core}=10(\Delta Bpp)^2\ Watt/cm^3$

ונפח הגרעין – $2cm^3$.

<u>שאלה מס' 4</u>

מניחים $L=5\mu H$

<u>4.1 (25%)</u>

חשב ושרטט את המתחים Vi, Ve (ראה שרטוט) במצב היציב.

<u>4.2 (35%)</u>

בהנחה שמשוב הזרם גורם לסליל להתנהג כמקור זרם, שרטט את פונקצית התמסורת $\frac{v_o}{v_e}(f)$.

רמז : הנח Ve=1V ובדוק איזה זרם יזרום בסליל, זה שווה מספרית ל- $\frac{i_L}{v_e}$ של מקור הזרם.

<u>4.3 (40%)</u>

על בסיס פונקצית התמסורת שהתקבלה ב-4.2 הצע רשת משוב וחשב R_f, R_i, C_f.

DC-DC Switch-Mode Converters

"moed Aleph"

$nC := 10^{-9}C$ $\quad ns := 10^{-9}s$ $\quad mW := 10^{-3}W$ $\quad m\Omega := 10^{-3}\Omega$ $\quad mT := 10^{-3}T$

Problem 1

1.1)

$\Delta I := 1A \qquad I_{load} := 5A$

$$D = \frac{Vo}{Vin} \qquad \frac{3.3V}{5V} = 0.66$$

$$L = \frac{Vo\cdot(1-D)}{\Delta I\cdot f_{sw}} = \frac{Vo\cdot\left(1-\frac{Vo}{Vin}\right)}{\Delta I\cdot f_{sw}} \qquad \frac{3.3V\cdot\left(1-\frac{3.3V}{5V}\right)}{1A\cdot 400kHz} = 2.81\,\mu H$$

1.2)

$\Delta t := 100ns \qquad \Delta I := 1A$

$I_{Lav} = I_{load} = 5A$

$$I_p = I_{Lav} + \frac{\Delta I}{2} \qquad 5A + \frac{1A}{2} = 5.5\,\mathrm{A}$$

$$I_m = I_{Lav} - \frac{\Delta I}{2} \qquad 5A - \frac{1A}{2} = 4.5\,\mathrm{A}$$

When Q1 switches OFF, the current through the inductor L continues to flow and discharges the equivalent capacitance Ceq in resonant manner. Supposing inudctor current constant, let's check the discharge rate:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{I_L(peak)}{C_{eq}} \qquad \frac{5.5A}{1nF} = 5.5\,\frac{V}{ns}$$

Time needed to discharge this capacitor from 5V to zero:

$$\frac{5V}{5.5\frac{V}{ns}} = 0.91\,ns \qquad (\ll \Delta t\ !!)$$

The resonant frequency of L-Ceq circuit: $\dfrac{1}{2\cdot\pi\cdot\sqrt{2.81\mu H\cdot 1nF}} = 3\,MHz$

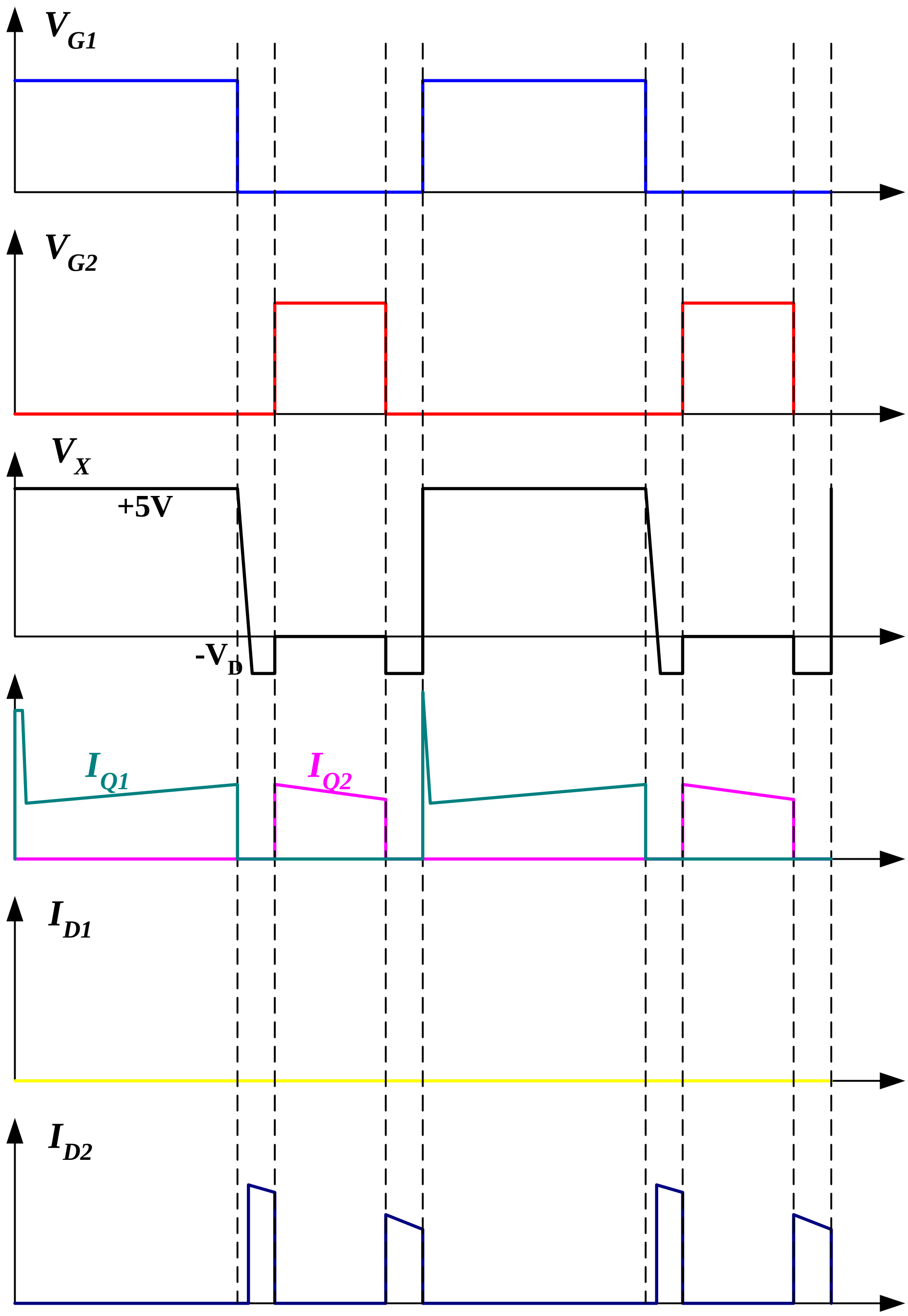
$$\frac{1}{3MHz} = 333\,ns$$

The possible voltage amplitude:

$$V = I \cdot \rho = I_p \cdot \sqrt{\frac{L}{Ceq}}$$

$$5.5A \cdot \sqrt{\frac{2.81\mu H}{1nF}} = 291.55\,V$$

From these calculations it can be concluded that capacitor voltage will be clamped by D2 diode and inductor current will flow through this diode until Q2 turns ON.



1.3)

$$P_{conduction} = I_{RMS}^{\,2} \cdot R_{DS_{on}}$$

Conduction losses for Q1:

$$I_{RMS} = \sqrt{D \cdot \left(I_p \cdot I_m + \frac{\Delta I^2}{3}\right)} \qquad \sqrt{0.66 \cdot \left[5.5A \cdot 4.5A + \frac{(1A)^2}{3}\right]} = 4.07\,\mathrm{A}$$

$$(4.07A)^2 \cdot 0.1\Omega = 1.66\,\mathrm{W}$$

Conduction losses for Q2:

$$I_{RMS} = \sqrt{(1 - D) \cdot \left(I_p \cdot I_m + \frac{\Delta I^2}{3}\right)} \qquad \sqrt{(1 - 0.66) \cdot \left[5.5A \cdot 4.5A + \frac{(1A)^2}{3}\right]} = 2.92\,\mathrm{A}$$

$$(2.92A)^2 \cdot 0.1\Omega = 0.85\,\mathrm{W}$$

Additional losses are <u>switching losses</u>.
Q1: hard switching tun-on, hard switching tun-off;
Q2: zero-voltage switching turn-on, zero-voltage switching turn-off.
(Q1 charges Ceq every turn-on cycle):

$$P_{Ceq} = \frac{C_{eq} \cdot V^2}{2} \cdot f_{sw} \qquad \frac{1nF \cdot (5V)^2}{2} \cdot 400kHz = 5\,mW$$

Q1 will be hotter then Q2

<u>Problem 2</u>

2.1)

$$\Delta I := 2A$$

The ripple due the ESR:

$$V_{ESR_{p-p}} = \Delta I \cdot ESR \qquad 2A \cdot 10m\Omega = 20\,mV$$

The ripple due the output capacitor charge-discharge:

$$V_{Co} = \frac{\Delta I}{8 \cdot C_o \cdot f_{sw}} \qquad \frac{2A}{8 \cdot 47\mu F \cdot 400kHz} = 13.3\,mV$$

2.2)

$$P_{Co} = \left(I_{Co_{RMS}}\right)^2 \cdot ESR = \left(\frac{\Delta I}{\sqrt{12}}\right)^2 \cdot ESR \qquad \left(\frac{2A}{\sqrt{12}}\right)^2 \cdot 10m\Omega = 3.33\,mW$$

2.3)

$$Q_{gate} := 30nC$$

$$I_{drive} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \qquad \frac{30nC}{50ns} = 0.6\,A$$

Problem 3

3.1)

$$\Delta I := 1A \qquad K := 0.5 \qquad B_{max} := 0.3T \qquad J := 4\frac{A}{mm^2}$$

$$L := 2.81\mu H$$

$$AP = \frac{L \cdot I_p \cdot I_{L_{RMS}}}{J \cdot K \cdot B_{max}}$$

$$I_{L_{RMS}} = \sqrt{I_{Lav}{}^2 + \frac{\Delta I^2}{12}} \qquad \sqrt{(5A)^2 + \frac{(1A)^2}{12}} = 5.01\,A$$

$$\frac{2.81\mu H \cdot 5.5A \cdot 5.01A}{4 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2} \cdot 0.5 \cdot 0.3T} = 129.05\,mm^4$$

3.2)

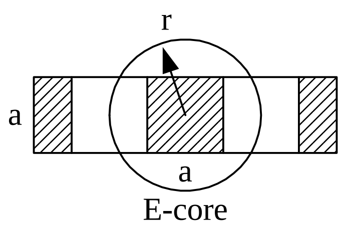
The conductivity of the copper wire is known: $\sigma_{cu_1} = x\left(\frac{\Omega^{-1}}{m}\right)$ (for specific wire diameter)

or $\sigma_{cu_2} = x\left(\Omega^{-1} \cdot m\right)$ (for any generic wire).

The effective core area A_e and other geometric parameters can be taken from the datasheet.

The Mean Length of Turn (MLT) can be taken from the datasheet too or calculated:

$$MLT = 2\pi r$$



$$R_L = \frac{MLT \cdot N}{\sigma_{cu_1}} = \frac{MLT}{\sigma_{cu_1}} \cdot \frac{L \cdot I_p}{B_{max} \cdot A_e}$$

or:

$$R_L = \frac{MLT \cdot N}{\sigma_{cu_2} \cdot A_{wire}} = \frac{MLT}{\sigma_{cu_2} \cdot A_{wire}} \cdot \frac{L \cdot I_p}{B_{max} \cdot A_e}$$

(supposing the wire area A_{wire} is given)

3.3)

$R_L := 50m\Omega$ $\qquad P_{core} = 10\cdot(\Delta B_{pp})^2 \frac{W}{cm^3}$ $\qquad V_e := 2cm^3$

$P_L = P_{core} + P_{cu}$

$P_{cu} = \left(I_{L_{RMS}}\right)^2 \cdot R_L$ $\qquad (5.01A)^2 \cdot 50m\Omega = 1.26\,W$

$$\frac{\Delta B}{B_{max}} = \frac{\mu \cdot \Delta H}{\mu \cdot H_{max}} = \frac{\frac{N \cdot \Delta I}{l}}{\frac{N \cdot I_p}{l}} = \frac{\Delta I}{I_p}$$

$\Delta B = B_{max} \cdot \frac{\Delta I}{I_p}$ $\qquad 0.3T \cdot \frac{1A}{5.5A} = 54.5\,mT$

$P_{core} = 10 \cdot (\Delta B_{pp})^2 \cdot \frac{W}{cm^3} \cdot V_e$ $\qquad 10 \cdot \left(54.5 \cdot 10^{-3}\right)^2 \cdot \frac{W}{cm^3} \cdot 2cm^3 = 59.4\,mW$

$1.26W + 59.4mW = 1.32\,W$

Problem 4

$L := 5\mu H$

4.1)

$\Delta I = \frac{Vo \cdot (1-D)}{L \cdot f_{sw}}$ $\qquad \frac{3.3V \cdot (1-0.66)}{5\mu H \cdot 400kHz} = 0.56\,A$

$I_p = I_{Lav} + \frac{\Delta I}{2}$ $\qquad 5A + \frac{0.56A}{2} = 5.28\,A$

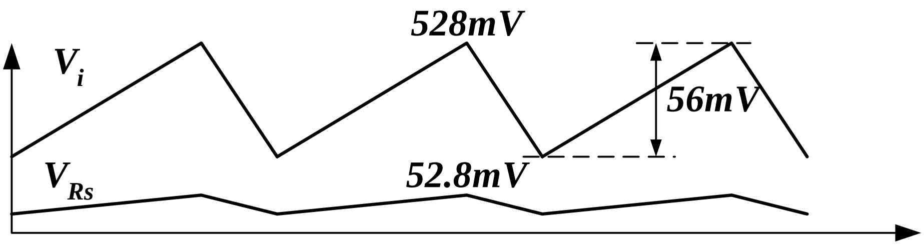
$I_m = I_{Lav} - \frac{\Delta I}{2}$ $\qquad 5A - \frac{0.56A}{2} = 4.72\,A$

$V_{Rs} = I_L \cdot R_s$

$\Delta V_{Rs} = \Delta I \cdot R_s$ $\qquad 0.56A \cdot 10m\Omega = 5.6\,mV$

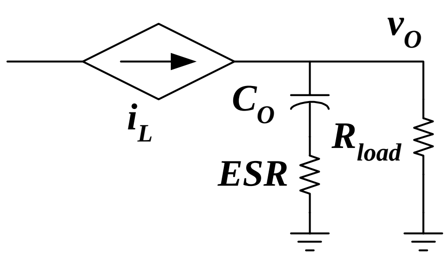
$V_{Rs}(peak) = I_p \cdot R_s$ $\qquad 5.28A \cdot 10m\Omega = 52.8\,mV$

$V_i = 10 \cdot V_{Rs}$



$V_e = V_i(peak) = 528mV$

4.2)



$$\frac{v_o}{v_e} = \frac{i_L \cdot Z_o}{v_e} = \frac{\frac{v_{Rs}}{R_s} \cdot Z_o}{v_e} = \frac{\frac{v_i}{10} \cdot \frac{Z_o}{R_s}}{v_e} = \frac{v_i}{v_e} \cdot \frac{Z_o}{10 \cdot R_s} = \frac{Z_o}{10 \cdot R_s} \qquad \left(\frac{v_i}{v_e} = 1\right)$$

$$Z_o = \frac{1}{\frac{1}{R_{load}} + \frac{1}{ESR + \frac{1}{j\omega \cdot C_o}}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{load}} + \frac{j\omega \cdot C_o}{1 + j\omega \cdot C_o \cdot ESR}} = \frac{R_{load} \cdot (1 + j\omega \cdot C_o \cdot ESR)}{1 + j\omega \cdot C_o \cdot (ESR + R_{load})} = ...$$

$ESR << R_{load}$

$$.... = \frac{R_{load} \cdot (1 + j\omega \cdot C_o \cdot ESR)}{1 + j\omega \cdot C_o \cdot R_{load}}$$

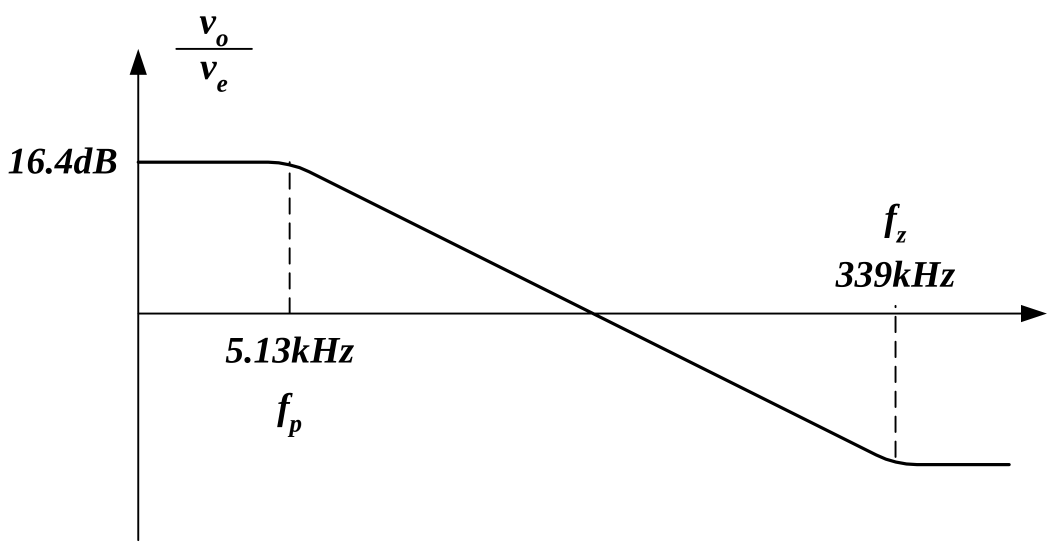
$$\frac{v_o}{v_e} = \frac{R_{load}}{10 \cdot R_s} \cdot \frac{1 + j\omega \cdot C_o \cdot ESR}{1 + j\omega \cdot C_o \cdot R_{load}} \qquad \frac{v_o}{v_e}(f) = \frac{R_{load}}{10 \cdot R_s} \cdot \frac{1 + j \cdot \frac{f}{f_z}}{1 + j \cdot \frac{f}{f_p}}$$

$$\frac{R_{load}}{10 \cdot R_s} \qquad \frac{0.66\Omega}{10 \cdot 10m\Omega} = 6.6$$

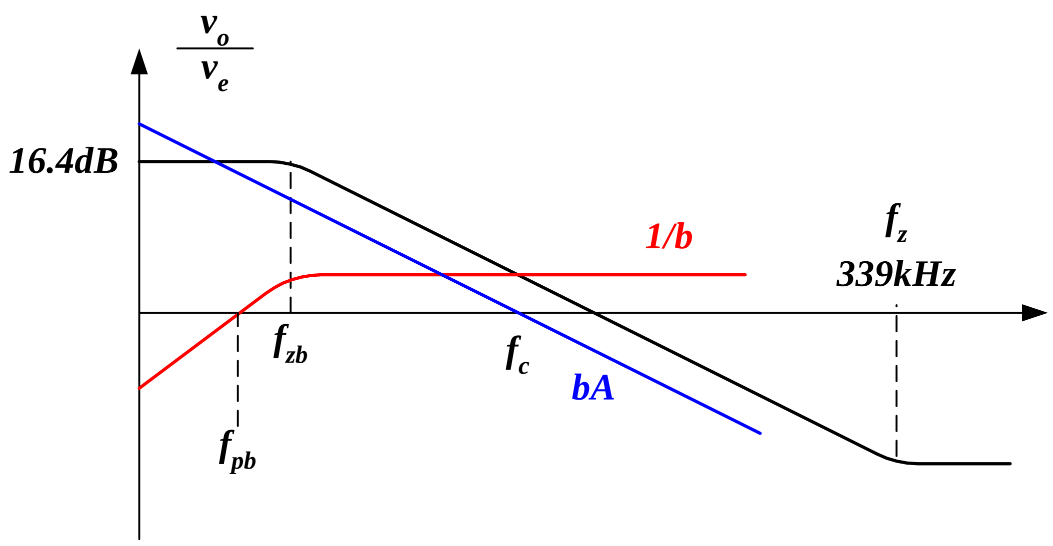
$$20 \cdot log(6.6) = 16.4$$

$$f_z = \frac{1}{2\pi \cdot C_o \cdot ESR} \qquad \frac{1}{2\pi \cdot 47\mu F \cdot 10m\Omega} = 339\,kHz$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi \cdot C_o \cdot R_{load}} \qquad \frac{1}{2\pi \cdot 47\mu F \cdot 0.66\Omega} = 5.13\,kHz$$



4.3)



$$\beta = \frac{1 + j \cdot \frac{f}{f_{z\beta}}}{j \cdot \frac{f}{f_{p\beta}}} \qquad f_{z\beta} = f_p = 5.13\,kHz$$

Open loop gain equals 0dB at: $5.13\,kHz \cdot 10^{\frac{16.4}{20}} = 33.9\,kHz$

Take crossover frequency at 20kHz: $f_c = 20\,kHz$

Then A_{OL} crosses $1/\beta$ at : $20 \cdot \log\left(\frac{33.9\,kHz}{20\,kHz}\right) = 4.58$ dB

The β pole frequency: $5.13\,kHz \cdot 10^{\frac{-4.58}{20}} = 3.03\,kHz$

$$f_{p\beta} = 3.03kHz = \frac{1}{2\pi C_f \cdot R_i}$$

$$f_{z\beta} = 5.13kHz = \frac{1}{2\pi C_f \cdot R_f}$$

Take $C_f = 10nF$.

$$R_i = \frac{1}{2\pi C_f \cdot f_{p\beta}}$$

$$\frac{1}{2\pi 10nF \cdot 3.03kHz} = 5.25k\Omega$$

$$R_f = \frac{1}{2\pi C_f \cdot f_{z\beta}}$$

$$\frac{1}{2\pi 10nF \cdot 5.13kHz} = 3.1k\Omega$$